

明治大学大学院理工学研究科

2013 年度

博士学位請求論文

# 電氣的刺激による飲食行為の拡張に関する研究

A Study on Augmentation of Eating and Drinking Activities  
by Electrical Stimulation

学位請求者 新領域創造専攻

中 村 裕 美

# 要旨

本研究は、人の飲食行為と摂取する食品の機能に着目し、電氣的刺激によってこれら飲食行為と食品の機能を拡張することを目的とする。

人は飲食行為に様々な役割や意味を持たせてきた。そして、飲食行為や食に関連する技術や手法を発展させてきた。情報科学技術分野でも食や飲食行為に関する研究は進められており、調理法の記録や共有手法、摂取した食品の記録と振り返り技術、そして快適な飲食環境の提供に向けた支援技術などが多く提案されている。また、それらに比べ萌芽的段階にあるが、飲食行為中の各種感覚への刺激出力手法も検討されつつある。

本研究は、飲食行為中の感覚刺激への情報出力、特に舌への味刺激の出力を対象とする。この際に、飲食行為によって摂取される食品の機能とその効果に着目する。食品が持つ機能についてはこれまでに第1次機能（栄養機能）、第2次機能（味覚・感覚または嗜好機能）、第3次機能（生体調節機能）があることが定義されている。このうち第1次機能（栄養機能）と第3次機能（生体調節機能）は主に身体へ影響を与えるものであり、飲食行為を介して摂取を行わずとも効果が発現する。しかし第2次機能（味覚・感覚または嗜好機能）は飲食によって味刺激を受容することではじめてその効果が発現する。そしてこの第2次機能（味覚・感覚または嗜好機能）は食品に対する嗜好を形成し、摂取する食品の選択に影響を与える。

本来生物の食品に対する嗜好は生理的欲求に基づいているので、身体が必要とする量を大幅に上回るような摂取は起こりにくい。しかし人の嗜好は情報や食文化などの影響も受けることから、嗜好を形成する要素が他の生物よりも複雑である。そのため嗜好が食品の摂取に影響を与え、摂取の過剰や不足を引き起こすことも考えられる。

このような摂取の過剰・不足を回避するために、調理や加工の過程で味と栄養素のバランスを包括的に制御する手法が多く提案されている。それに対し、第2次機能（味覚・感覚または嗜好機能）のみを制御する手法も提案されており、他感覚への刺激出力によって起こる感覚間相互作用を用い、擬似的においしさを制御する手法や、味覚修飾物質など受容器を制御して味覚を変化させる手法が提案・構築されている。他感覚へ刺激を出力する理由の一つとして、味刺激の出力による第2次機能（味覚・感覚または嗜好機能）の制御は出力・除去が複雑であり、任意かつ可逆的な制御が行いにくい点が挙げられる。また、味覚修飾物質も、効果の持続が一定時間継続してしまうため、制御性にかかる側面があった。そのため、味刺激を食品に付加でき、かつ任意に可逆的な制御が行える手法が待たれていたといえる。

本研究は、電氣的刺激によって感じられる味質に着目した。電氣的刺激を舌面に出力した際に感じられる感覚は一般的に電気味覚と称されており、多くの研究が展開され、味質

や機序についての知見が導出されてきた。電気味覚の活用用途は主に簡易味覚検査である電気味覚検査であり、電気味覚計の提案と改良がおこなわれてきたが、近年ではこの電気味覚を味質の提示や情報の代替提示手法として活用する例も見受けられる。しかしこれら手法は基本的に電極を直接舌面に接触させ、電気味覚の味質のみを提示するものであった。

本研究ではこの電気味覚による味質を、飲食行為を介して食品の味質に付加することで味質を制御し、食品の第 2 次機能（味覚・感覚または嗜好機能）を制御する手法を提案する。まず、飲食行為を介して電気味覚による味質を食品の味質に付加する装置を構築し、その装置の制御性について検証を行う。その上で、塩分を変化させずに塩味を制御する手法を提案する。そしてこの提案の検証と考察を行うとともに、塩分の摂取において問題となる過剰摂取について、第 2 次機能（味覚・感覚または嗜好機能）を制御することで摂取の過剰を抑える一助として活用できるかについて議論する。

第 1 章では、人における飲食行為の役割や意義と飲食行為によって摂取される食品の機能を紹介するとともに、飲食行為に対する技術の貢献について説明する。また、摂取する食品の選択について食品の機能の観点から影響する要素と問題点を議論する。その上で、本研究の目的と手法、本論文の構成について述べる。

第 2 章では、本研究に関連する基礎知識および先行研究の紹介を行う。本章は味覚器およびおいしさの構造、情報科学技術の活用事例、そして電気味覚における知見について説明を行う。まず味覚器およびおいしさの構造として、舌や味覚器の構造について説明し、食品が持つ味物質がどのように受容されるか説明する。また、受容器に影響を与え味覚の受容を変化させる味覚修飾物質を紹介する。次に、情報科学技術の活用事例について述べる。まず人における味やおいしさの認識と、嗜好に影響する要素について説明する。その上で、他感覚への刺激出力による感覚間相互作用を用いた手法と、食品の加工への情報科学技術の活用例について紹介する。最後に電気味覚に関する知見について述べる。まず現時点で提唱されている電気味覚の機序について説明した上で、味質などの特性について述べる。そして、この電気味覚の主たる活用例である電気味覚計の提案と変遷について述べ、電気味覚計を用いて行う電気味覚検査とその臨床応用を紹介する。最後に、電気味覚を活用した情報出力手法について説明し、近年の電気味覚の活用について述べる。

第 3 章では、飲食行為を介して電氣的刺激による味質を食品の味質に付加する装置について説明する。まず装置のデザインとして付加装置に求められる要素について検討し、その検討を元に試作した装置について述べる。試作装置においては両電極を食品に接触させる両極型装置と、片方の電極を食品にもう片方の電極を人体皮膚表面に接触させる一極型装置に分類し、それぞれに対し試作した飲料用装置と食料用装置の仕組みについて記す。そしてこの装置の検証として、刺激の提示から受容までの時間である味覚反応時間を計測する。加えて極性の差異による味質変化が食品を介しても知覚されるかについて検証し、付加効果について考察する。

第 4 章では食品の味質の制御による第 2 次機能（味覚・感覚または嗜好機能）の制御例として、Hettinger らの先行研究を活用した陰極刺激による塩味制御手法を提案する。この提案に際し、Hettinger らの調査で得られた知見を説明するとともに、その理学的知見を工学的に応用した飲食行為を検知し自動的に食品への陰極刺激の付加と停止を行うシステムについて説明する。そして本装置における塩味制御効果と食品の味質の変化の検証について手法とその結果を述べる。最後に、本システムの塩味制御機能による嗜好への影響や塩分摂取への影響について議論する。

第 5 章では、本研究の結論について述べる。ここではまず電氣的刺激の付加手法に関する結論として、本論文で提案・試作した装置とその検証から得られた結論を述べる。その上で、飲食行為と食品の機能の拡張に関する結論として、塩味制御手法の提案と検証から得られた結論を述べる。

第 6 章では、展望として、試作装置の他の活用例、装置の長期的利用に向けた改善点、本研究の各種分野への貢献と展望について述べる。試作装置の他の活用例として、付加する電氣的刺激データの共有手法、複数人での活用手法と、センサを用いて外界情報を取得し、その情報を電気味覚刺激に置き換え味覚器の弁別能や感知能力を向上させる味覚拡張手法について説明する。次に、装置の長期的利用に向けた改善点として、食器としての改善、保守に向けた装置外装の改良、そして提示刺激の改善について述べる。最後に本研究の各種分野への貢献と展望として、味覚・食品分野、電気味覚分野、情報科学分野、HCI (Human-Computer Interaction) 分野等における貢献と展望を述べる。

# Abstract

In this thesis, I propose a method and a system for augmenting eating activities and functions concerned with food utilizing electric taste. Humans have eaten and continue to eat throughout history. Eating has many roles and meanings for humans; therefore, we have developed eating activities and technology concerned with food.

The area of computer and information science research has also focused on these areas; consequently, different studies have proposed methods for recording and sharing recipes, recording dinner logs, and making comfortable eating places. In addition, studies have also proposed methods for outputting sensory stimulation.

I have proposed methods for augmenting eating activities and functions concerned with food. On this occasion, I focused on the functions and effects of food. Food has three main functions: sustenance; taste, sense, and preference; and biological regulation. The first function (sustenance) and the third function (biological regulation) have an effect on our body, and the second function (taste, sense, and preference) produces an effect when we eat and drink.

In addition, the second function (taste, sense, and preference) affects our choice of the type of food we eat. Normally, human does not tend to consume the foods we want in excessive quantities, because our preference is based on physiological drives. However, humans' preference is more complicated because our preference is affected by information and personal communication. Hence, preference and the effects of eating foods affect the balance between the three functions, which results in excessive or inadequate intake of sustenance.

Naturally, we control this balance of taste and sustenance in the process of cooking. In contrast, researchers also propose the method of controlling only taste, sense, and preferences. For example, some researchers use cross-interaction of the senses to cause a pseudo-change of taste. In addition, taste-modifying substances might be used because this substance can only change our perception of taste. However, controlling our second function (taste, sense, and preference) by outputting the taste stimulus is considered difficult. Because outputting and removing a tastant is complicated, controlling the tastant arbitrarily and reversibly appears difficult. Hence, the method of adding a taste stimulus and being able to control it arbitrarily and reversibly has long been expected.

In this thesis, I focused on the taste that is perceived when our tongue receives electricity. This taste is usually called "electric taste," and many studies have revealed this function and taste qualities. An electrogustometer has been proposed and improved because the electric taste is used mainly in gustometry. Recently, some studies have used the electric taste to present taste qualities.

I propose to control taste quality by adding the electric taste quality to the taste of foods. In other words, I propose to control the second function (taste, sense, and preference) using electric taste. First, I produce a prototype that can apply electric taste through eating activities, and I evaluate this prototype. In addition, I propose a method for controlling saltiness without adding salt, by controlling the taste of saltiness. In addition, I evaluate and discuss my findings that this system can control the balance between the three functions, and prevent an excessive intake of salt.

In the first chapter, I introduce the roles and meanings of eating in humans, and the contribution of several technologies regarding eating and cooking. In addition, I discuss the function of food and the ingestion of food and beverages. I also discuss the factors that are affected by choosing food from the aspect of food function and suggest problems. Finally, I introduce existing proposal and their problems. Based on the acknowledgment, I introduce the purpose, implementation, and composition of my thesis.

In the second chapter, I introduce fundamental knowledge and works related to my study. First, I introduce the structure of the organ used for taste: the tongue and the taste receptors, and describe how our taste receptors receive tastants. In addition, I discuss taste-modifying substances that influence our taste receptors and change our perceptions of taste. Next, I introduce studies that utilize information technologies for eating and cooking. After introducing the human experience of taste and delicacy, I introduce two areas of study: controlling taste using cross-modal interaction, and outputting and modifying systems utilizing 3D printers, laser cutters, and so on. Finally, I introduce the electric taste. After introducing the mechanism and the quality of electric taste, I trace the history of electrogustometry and the electrogustometer. In addition, I discuss the usage of the electric taste in recent studies by introducing methods for the information output system that uses the electric taste.

In the third chapter, I introduce methods for applying the taste quality of electricity through our eating and drinking behavior. After discussing the integrants of our system, I describe prototypes based on these integrants. In this thesis, I categorize my prototypes into two types: a bipolar type in which two electrodes are attached to food, and a single-polar type in which one electrode is attached to food and a separate electrode is attached to a human. In addition, I measure the reaction time, and verify the taste qualities that can be perceived with anodal and cathodal stimulus.

In the fourth chapter, I introduce a saltiness enhancer using a cathodal current based on the work of Hettinger et al. After introducing Hettinger et al.'s study, I describe a system that has an eating detection unit and an automatic applying and releasing unit. Furthermore, I introduce an evaluation method that measures the taste intensity of food when a saltiness enhancer is applied, in order to verify the effectiveness of our system.

In the fifth chapter, I describe the conclusion to my study in two aspects: first is a prototype that I propose and with which I perform experiments; next is the augmentation of eating activities and foods through my proposed system, the saltiness enhancer.

In the sixth chapter, I discuss the vision of my study. First, as the other use of my prototype, I describe a method for the sharing system or the electric taste, the usage of multi-users, and the augmentation

of our sense of taste using several sensors and the electric taste. Next, and for long term use, I discuss improvements to my prototype. In this topic, I discuss three points: improvement of eating utensils, exterior package, and output stimulus. In the last part of my thesis, I describe the contribution and vision of four areas: taste and food, electric taste, Information technology, and human computer interaction.

# 目次

## 1. 序論

1.1	はじめに	1
1.2	本研究の目的と手段	3
1.3	本論文の構成	5

## 2. 関連研究

2.1	味覚受容	7
2.1.1	味覚器の構造と味の受容	7
2.1.2	味覚修飾物質	12
2.2	情報科学技術の活用	13
2.2.1	嗜好とおいしさ	13
2.2.2	他感覚への刺激出力	15
2.2.3	食品の加工	19
2.3	電気味覚	22
2.3.1	発現機序	22
2.3.2	味質と特性	24
2.3.3	電気味覚計	27
2.3.4	脳情報処理	29
2.3.5	情報提示	30
2.4	安全性に対する配慮	32



2.4.1	人体への電氣的刺激出力	32
2.4.2	電気味覚計の電氣的刺激 提示機構	33
2.4.3	本研究での配慮	34
3.	電気味覚付加装置の試作と検証	
3.1	装置のデザイン	35
3.2	試作装置の構造	36
3.2.1	両極型装置の構造	37
3.2.2	一極型装置の構造	40
3.3	試作装置の検証	44
3.3.1	検証 1：味覚反応時間の比較	45
3.3.2	検証 1：手法	46
3.3.3	検証 1：結果	47
3.3.4	検証 2：極性変化	48
3.3.5	検証 2：手法	48
3.3.6	検証 2：結果	50
3.4	考察	51
3.4.1	検証 1：考察	51
3.4.2	検証 2：考察	52
3.5	おわりに	53

4.	飲食行為における食品の機能の拡張	
4.1	本提案の対象	56
4.2	背景	57
4.2.1	塩分の摂取と健康	57
4.2.2	減塩手法と代替技術	58
4.2.3	陰極刺激の味覚制御効果	60
4.3	陰極刺激の付加と停止による 塩味味覚感度制御システム	62
4.3.1	陰極刺激付加装置	65
4.3.2	飲食行為検知部	65
4.3.3	陰極刺激付加部	66
4.4	塩味味覚感度制御システムの検証	67
4.4.1	検証 1：味覚感度の制御性	67
4.4.2	検証 1：手法	67
4.4.3	検証 1：結果	69
4.4.4	検証 2：味質の変化	70
4.4.5	検証 2：手法	70
4.4.6	検証 2：結果	72
4.5	考察	73
4.5.1	検証 1：考察	73

4.5.2	検証 2：考察	74
4.6	おわりに	77
5.	結論	
5.1	電氣的刺激の付加手法において	80
5.2	飲食行為と食品の機能の拡張において	81
6.	展望	
6.1	試作装置の活用事例	83
6.1.1	電気味覚配信	83
6.1.2	複数人での飲食行為	84
6.1.3	味覚拡張	85
6.2	長期的使用に向けた改善	87
6.2.1	食器としての改善	87
6.2.2	金属部の改善	90
6.2.3	出力電源部の改善	90
6.3	各分野への貢献と展望	91
6.3.1	食品・味覚分野	91
6.3.2	電気味覚分野	92
6.3.3	情報科学分野	93
6.3.4	HCI 分野	94

謝辞	96
参考文献	98
本研究に関する発表論文	109

# 図目次

図 2.1	人の口内と各種乳頭の形状	8
図 2.2	味蕾の構造	9
図 2.3	おいしさの構造	14
図 2.4	電気味覚計 TR - 06	28
図 2.5	人体通過電流と安全・危険域	33
図 3.1	食料用両極型装置の概観と仕組み	38
図 3.2	飲料用両極型装置の概観と仕組み	39
図 3.3	食料用一極型装置の概観と仕組み	41
図 3.4	食料用一極型装置の内部構造	42
図 3.5	飲料用一極型装置の概観と仕組み	43
図 3.6	被験者毎の味覚反応時間平均	47
図 3.7	味覚反応時間の被験者間平均と各種呈味物質との比較	48
図 3.8	リストバンド型電極と装着時の状態	49
図 3.9	実験環境	50
図 4.1	ゴールデンハムスターを用いた電気生理学計測	60

図 4.2	提案システム利用時に想定される塩味の変化	63
図 4.3	塩味味覚感度制御システム	64
図 4.4	実験環境	72
図 4.5	味質毎の付加前・付加中・停止後の味覚強度	73
図 6.1	複数人使用法時の回路構成	85
図 6.2	感覚の代替，増幅，拡張	86

# 表目次

表 3.1	被験者毎のグルーピング結果	50
表 3.2	陽極刺激及び陰極刺激に対する自由回答	51
表 4.1	試行回数に対する味覚感度制御成功回数	69
表 4.2	被験者毎の元の食材と停止後の味の濃さの比較	70



## 1. 序論

# 1. 序論

## 1.1 はじめに

多くの生物は飲食行為によって食品を摂取し、生命維持に必要な栄養を得ている。そして人は飲食行為に様々な役割や意味を持たせている。もちろん食事環境や自身の状態によっては栄養摂取の役割のみを果たす行為とすることもあれば、交流の機会や節目の儀式などの社会的意義を兼ねる場合もあるだろう。

人は飲食行為や摂取する食品を改良し続け、食文化として発展させてきた。調理法の発展は摂取する食品のバリエーションを豊かにし、保存法の構築は食品の安定した供給を助けている。そして飲食行為を行う環境や、その環境でのコミュニケーションに対しても、食品がよりおいしく見える内装や、会話と食事が並行される際の行動などが分析され、その分析を元とした環境の構築が行われてきた。これらの改良や発展にはその時代の技術も深くかかわっている。近年では調理法の記録・共有手法や食事内容の記録・振り返り技術、飲食行為中の刺激出力など、飲食行為や調理行為を支援する情報科学技術も多岐にわたり提案されるようになった。そしてこれらの食や調理に関連する研究は食メディア研究とも称され[1][2]、分野として発展を見せている。

本論文は飲食行為中の感覚刺激出力、特に摂取される食品の機能を考慮した感覚刺激出力に焦点をあてる。ここで対象とする食品は、われわれが日常的に摂取する食品とする。この食品が人体に及ぼす作用や働きは食品の機能と定義され、第1次機能、第2次機能、第3次機能の3つに分類されている[3]。第1次機能は食品の生命維持に必要なエネルギー摂取源とし







## 1. 序論

ての機能で、生体に対して栄養学的な効果を与える。これは一般的に栄養機能と称されている。第2次機能は食品が有する味や香りなどおいしさや嗜好の元となる機能で、摂取すべき食品の選択や嗜好に効果を与える。これは一般的に味覚・感覚機能または嗜好機能と呼ばれる。そして第3次機能は病気の予防や健康の維持増進の機能で、生体に対してその状態を維持した上で良好に保つ効果を与える。これは生体調節機能と称されている。

これらの3機能は食品の摂取によって効果を発揮する。特に第2次機能である味覚・感覚または嗜好機能は飲食行為によって効果があらわれる。そして、飲食行為によって食品を摂取したときに、上記の機能群による効果がお互いに影響を与え、その後の食品の摂取に影響を与えることもある。食品は栄養価を持ち、何らかの味を提示し、そして生体の調節を行う。その際に、特に生体に必要な栄養価の味は好ましい味として認識される。これは生物全般に見受けられ、味覚や嗜好は生体に必要な栄養価の味を好ましいものとして感じ、効率的に摂取する判断材料として働いてきた。この栄養価に基づいた嗜好は生理的嗜好と呼ばれる。

多くの生物において生理的嗜好に基づいた食品の選択が過剰摂取につながることはほとんどないといえる。しかし、この生理的嗜好は食品が十分に得られない環境下で培われてきた嗜好であるため、体内に蓄えられない栄養などは少しの欠如で不足感を感じさせてしまう。さらに人の嗜好は他の生物より複雑で(2.2.1に後述)、生理的嗜好以外の嗜好も食品の選択に影響を与える。そのため食品の機能が発揮する効果のバランスによっては、その後摂取する食品の選択に影響を与え、摂取の過剰・不足を引き起こさせる可能性も考えられる。

この効果のバランスを調整するための手法も考えられている。たとえば食品の加工や調理によって、飲食行為を行う前に、栄養価と味のバランスを包括的に整えることができる。具体的には、摂取過剰となる栄養価を含む食品を他の食品で代替するような手法や、加工や調理で味を引き立たせ





## 1. 序論

るような方法（第4章に後述）などがあげられるだろう。代替食品を用いる場合、その食品も摂取によって3つの機能が働くことを踏まえて用いる必要がある。そのため代替した食品が与える効果を考慮して加工や調理が行われる。また情報科学技術を活用した研究の中にも、食品の加工において任意の栄養と味を持つ食品を構築するような研究や食感を変化させるような研究が行われている（2.2.3に後述）。

食品の調理や加工が栄養価や味を包括的に制御するのに対し、味覚修飾物質や（2.1.2に後述）、情報科学技術を用いた飲食行為に合わせて味覚・感覚または嗜好機能を制御する手法（2.2.2に後述）が提案されている。嗜好に影響を与える味やおいしさは味覚からの情報のみで構成されるわけではなく、各種感覚から入力された刺激の相互作用を受ける（2.2.1に後述）。そのため、特に情報科学分野では触覚や嗅覚、視覚など味覚以外の感覚へ刺激を出力し、擬似的な制御を行う手法が提案されてきている。他感覚への刺激出力手法が多くとられる理由には、味覚刺激を用いるよりも制御が行いやすいこともあるだろう。呈味を有する化学物質を出力する機構はそこまで複雑ではないが、食品または舌面から除去することが難しい。そのため任意の制御が行いにくい。味覚修飾物質は、化学的な反応により味覚器での受容と伝達を制御できるが、味覚修飾物質のほとんどは効果が数分から数十分程度持続してしまうため、一口一口の効果を制御するといった即時的、可逆的な制御は行いにくい。そのため、舌面および味覚器に直接刺激を出力でき、かつ即時的、可逆的な制御性に優れる手法の開発が待たれていた。

## 1.2 本研究の目的と手段

舌面へ電氣的刺激を与えると味を含む感覚を誘起できる。これは一般的に電気味覚と称されている。この電気味覚は舌面への味を含む刺激出力でありながらそれに伴う栄養価を全く持たないという特徴がある。





## 1. 序論

本論文では飲食行為中に電氣的刺激を出力することによって飲食行為と食品の機能を拡張する。まず、電氣的刺激による味質の変化を食品の摂取にあわせて制御し、食品がもつ味質に電氣的刺激による味質を付加する手法を提案する。

その上で、飲食行為における食品の機能の拡張の例として、塩の摂取を対象とした例をあげる。塩の摂取は、第1次機能（栄養機能）に關与する塩分を摂取するために必要である。そして飲食行為によって摂取するときには、第2次機能（味覚・感覚または嗜好機能）が作用し、塩味を感じる。この塩分摂取における塩味の作用がもたらす食品の選択と嗜好について議論したうえで、塩分量を変動させずに塩味を制御する手法を提案する。そしてこのような栄養価の変動を起こさない味の制御が飲食行為における食品の選択におけるバイアスを制御する助けとなり、摂取の過剰・不足に貢献できるかについて議論する。

電気味覚はこれまでも味覚検査や情報提示装置として活用されてきた。これらの手法は舌面に金属電極を接触させており、味刺激のみを仮想的に再現させる技術として展開されてきた。本論文ではこれら先行研究から得られた知見を活用するが、大きく異なるのは電氣的刺激を与えるために舌に接触させる部分が金属電極でなく食品となること、電気味覚による味質が食品の持つ味質に付加されることである。そのため、種類・サイズなどを一定に保った検査用金属電極を用い、接触面に対して一定の統制を取る味覚検査に比べ、刺激の出力において媒介する食品の種類・サイズが多様となる。また飲食行為という条件に統制がとりにくい環境下で用いられる差異が生じる。さらには、食品の味質への付加による重畳・混合効果が発生することが予期される。そのため、食品への電氣的刺激の付加で味覚・感覚または嗜好機能の制御に貢献できるかを検証することが必要となる。





## 1. 序論

### 1.7 本論文の構成

本論文の構成を述べる。第2章では、本研究に関連する基礎となる知見や先行研究の紹介を行う。具体的には味覚器やおいしさの構造、情報科学技術の活用事例、そして電気味覚における知見について説明する。味覚器やおいしさの構造では、舌や味覚器の構造や食品が持つ味物質がどのように受容されるかについて述べる。また、受容器に影響を与え味覚の受容を変化させる一例として味覚修飾物質を紹介する。情報科学技術の活用事例では人における味やおいしさの認識と、嗜好に影響する要素について説明した上で、他感覚への刺激出力による感覚間相互作用を用いた手法と、食品の加工への情報科学技術の活用例について紹介する。そして電気味覚に関する知見について、まず現時点で提唱されている電気味覚の機序と、味質などの特性について述べる。そしてこの電気味覚の主たる活用例である電気味覚計の提案と変遷について述べ、電気味覚計を用いて行う電気味覚検査とその臨床応用を紹介する。最後に、電気味覚を活用した情報出力手法について説明し、近年の電気味覚の活用について紹介する。

第3章では、飲食行為を介して電氣的刺激による味質を食品の味質に付加する装置について説明する。まず装置のデザインとして付加装置に求められる要素について検討し、その検討を元に試作した装置について述べる。試作装置は両電極を食品に接触させる両極型装置と、片方の電極を食品に、もう片方の電極を人体皮膚表面に接触させる一極型装置に分類し、それぞれに対し試作した飲料用装置と食料用装置の仕組みについて記す。そしてこの装置の検証として、刺激の提示から受容までの時間である味覚反応時間を計測する。加えて極性の差異による味質変化が食品を介しても知覚されるかについて検証し、付加効果について考察する。

第4章では食品の第2次機能（味覚・感覚または嗜好機能）に情報を付加し、味質を制御する手法として、Hettingerらの先行研究を活用した陰





## 1. 序論

極刺激による塩味制御手法を提案する．この提案に際し，Hettinger らの調査で得られた知見を説明するとともに，その理学的知見の工学的応用として構築した飲食行為を検知し自動的に食品への陰極刺激の付加と停止を行うシステムについて説明する．そして本装置における塩味制御効果と食品の味質の変化の検証について手法とその結果を述べる．最後に，本システムの塩味制御機能と塩分摂取への影響について議論する．

第 5 章では，本研究の結論について述べる．ここではまず電氣的刺激の付加手法に関する結論として，本論文で提案・試作した装置とその検証から得られた結論を述べる．その上で，飲食行為と食品の機能の拡張に関する結論として，塩味制御手法の提案と検証から得られた結論を述べる．

第 6 章では，展望として，試作装置の他の活用例，装置の長期的利用に向けた改善点，本研究の各種分野への貢献と展望について述べる．試作装置の他の活用例として，付加する電氣的刺激データの共有手法，複数人での活用手法と，センサによる外界の検知を電気味覚刺激に置き換え味覚器の弁別能や感知能力を向上させる味覚拡張手法について説明する．次に，装置の長期的利用に向けた改善点として，食器としての改善，保守に向けた装置外装の改良，そして提示刺激の改善について述べる．最後に本研究の各種分野への貢献と展望として，味覚・食品分野，電気味覚分野，情報科学分野，HCI（Human-Computer Interaction）分野等における貢献と展望を述べる．





## 2. 関連研究

## 2. 関連研究

本章では，本研究を進めるにあたり，基礎となる知見や研究について説明する．まず，2.1 で味覚・感覚機能または嗜好機能の元となる刺激を受ける味覚器の仕組みと受容の構造について述べる．次に2.2 で人の味受容における体系と嗜好の仕組みを紹介し，その知見を活用した情報科学技術での感覚制御手法や，食品の加工手法について説明する．そして2.3 では，本研究で味覚・感覚機能の制御に用いる電気味覚の機序や特性，活用手法について説明する．

### 2.1 味覚受容

#### 2.1.1 味覚器の構造と味の受容

味覚とは，食物に含まれる水溶性化学物質が味覚受容器である味蕾に接触することで起こる化学感覚のことである．嗅覚も同じく化学感覚であるが，化学物質と接触するかしないかという点で異なる[4]．





## 2. 関連研究

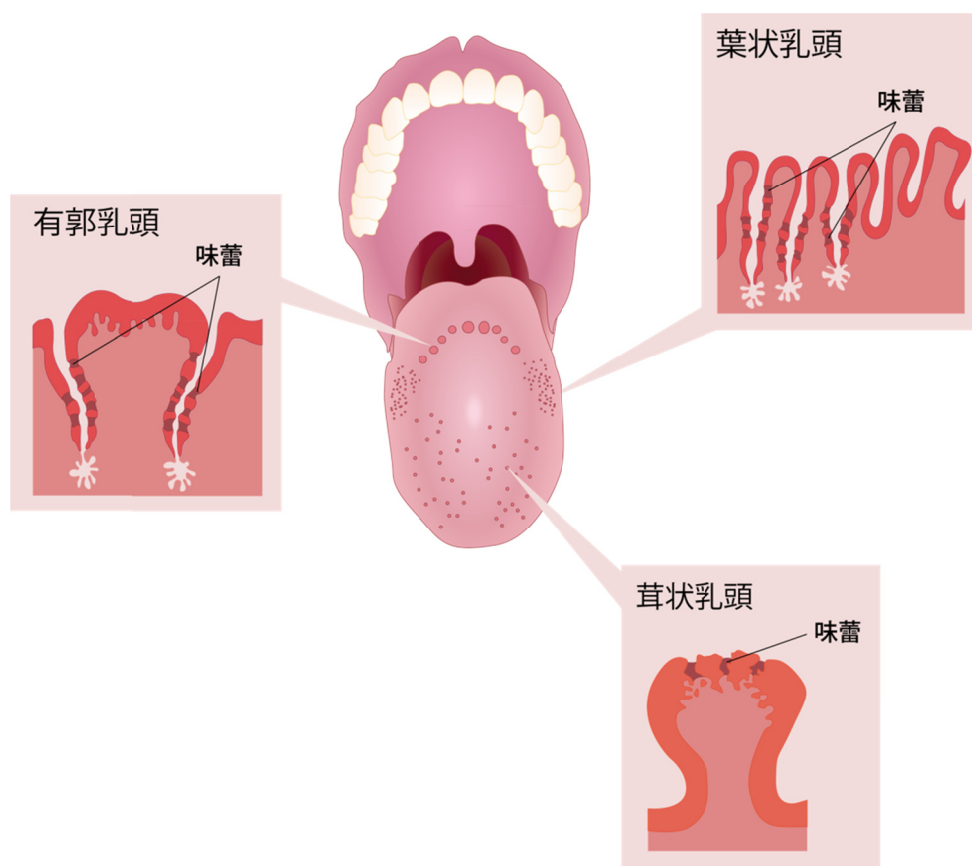


図 2.1 人の口内と各種乳頭の形状([5]を一部修正)

舌の大きさは男性でおよそ縦 7cm, 横 5cm, 厚さ 2cm であり, 女性では各々数 mm ずつ小さい[6]. 本研究ではこの舌面に対して, 電氣的刺激を出力する. 味蕾の数は舌上がもっとも多いが(図 2.1), 他にも口蓋, 咽頭後壁, 喉頭蓋の粘膜上皮にも点在している. 舌上には乳頭と呼ばれる突起があり, 突起ごとに複数の味蕾を有している. 人の舌では後方に有郭乳頭, 側面に葉状乳頭, 前方特に舌尖中央部に密集する形で茸状乳頭が存在する. 乳頭の数是有郭乳頭が 7~9 個(平均  $8.6 \pm 1.5$  個), 葉状乳頭が 4~18 個(平均  $10.8 \pm 2.90$  個)[7], 茸状乳頭が 158~565 個(平均  $365 \pm 129$  個)である. それぞれの乳頭に含まれる味蕾の数も異なり, 有郭乳頭 1 個あたりには 12~624 個(平均  $234 \pm 114$  個)[8], 葉状乳頭 1 個あたりには 13~441 個(平均  $117 \pm 72$  個)[9], 茸状乳頭は総数では約 1600 個と推定



## 2. 関連研究

されているが[10]，1個あたりに含まれる味蕾数がまちまちであると報告されている．実際に茸状乳頭においては1個あたりの味蕾数が多いものでは18個あるとしているが，たいていは4個程度であり，23%程度は味蕾を含まないものがあるとの報告がある．また，乳頭によって含まれる味細胞種の割合が異なる．

味蕾の中には味細胞が存在する（図 2.2）．味蕾の味孔内は，茸状乳頭以外ではⅠ型細胞のゴルジ体から分泌された電子密な物質で満たされており，その中に微絨毛が浮いた状態となっている．味覚刺激の受容と伝達は，味蕾の味孔に突出している味細胞微絨毛膜に，唾液に溶けた化学物質が接触することで発生する．

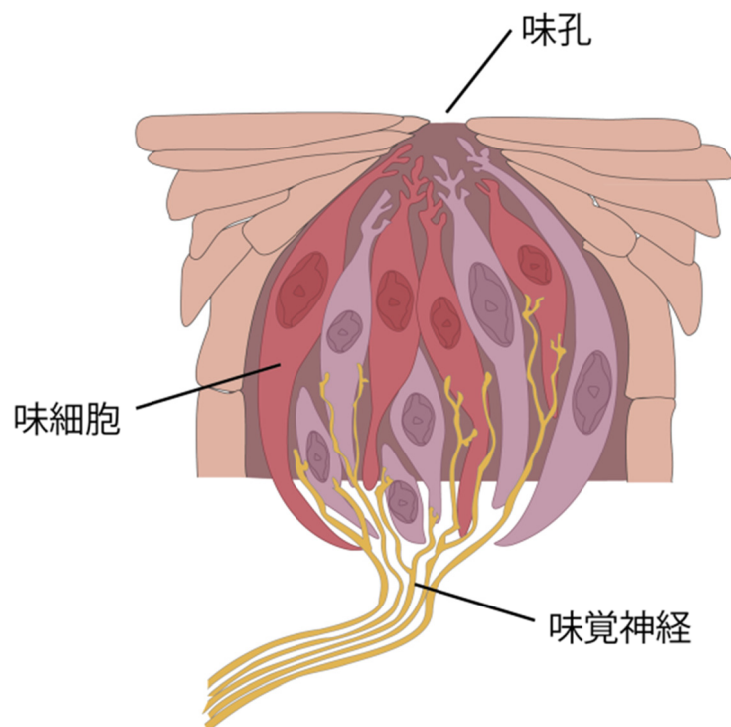


図 2.2 味蕾の構造







## 2. 関連研究

この味細胞微絨毛膜での反応は、接触する物質や味覚受容体によって異なる。甘味、苦味、うま味を引き起こす化学物質はそれぞれ型の異なる G タンパク質共役受容体に対応している。それに対し、酸味と塩味はイオンチャネルという特定のイオンを一定方向に通すタンパク質構造体に対応している。塩味は、食塩などに含まれるナトリウムイオンが上皮型ナトリウムチャネル (ENaC: Epithelial Sodium Channel) を通過することによって起こるという説が提唱されている。そして味を受容していない時には細胞の内部がマイナス、細胞の外部がプラスに荷電している。このナトリウムチャネルの細胞内部と細胞外部の電氣的な平衡は、ナトリウムイオンの通過によって壊される。この活動が一般的に脱分極と呼ばれており、この変動でナトリウムチャネルとカルシウムチャネルが開き、細胞外からカルシウムイオンを流入させる。そしてこの流れが引き金となり神経伝達物質が放出される。

酸味の受容には水素イオンが関係している。その機序は現段階で 3 通り発見されているが、全て陽イオンが細胞内にとどまることによる細胞の興奮（脱分極）である。1 つ目は水素イオンが上皮性ナトリウムチャネルなどを通して直接細胞内に入り込むもの、2 つ目がカリウムチャネルの入り口を塞いでカリウムイオンが細胞内にとどまるようにするもの、3 つ目が他の陽イオンが細胞内に入り込めるように水素イオンが入り口を開けるものである [11]。

上記の受容構造は基本味の構造である。この基本味とは塩味、甘味、苦味、酸味、うま味の 5 種類のことを指すが、基本味は以下の項目を満たすことが求められている。1 つ目に明らかに他の基本味の味質と異なること、2 つ目に多くの食品に含まれる物質の味であること、3 つ目に他の基本味と組み合わせても対象としている味を作れないこと、4 つ目に他の基本味と受容体が異なること、そして 5 つ目に基本味の味質の情報だけを伝える単一味神経線維が存在することである [12]。





## 2. 関連研究

受容体での反応により神経伝達物質が放出されることで、脳にそれぞれの味質が伝達される。この伝達及び処理機構も現時点では3つの仮説が提唱されている。1つ目は Across-neuron pattern Theory で、全ての味の伝達に全ての味覚神経線維が介入する説である。この場合、各味の差異は興奮の程度とパターンで伝達される。2つ目は Labeled-line Theory で、1本1本の味覚ニューロンが基本味のうちどれか1種だけを特異的に伝えているというものである。そして3つ目は、Across-region pattern Theory である。これは各刺激によく応答するニューロンが存在する説で、刺激の局在性が神経興奮の空間パターンを作り出し、味質の識別要素となると考えられている[13]。

付加の対象となる食品の味質は上記のような機序で受容される。それに対し、2.3.1 で後述するが電気味覚は基本味のように舌面の味蕾に物質を接触させるわけではなく、基本味の条件のいくつかに該当しないため、基本味にはふくまれない。とはいえ電気味覚の機序の仮説として受容器を刺激し味刺激を誘起する説も提唱されているほか、伝達の一部は味覚刺激と同様である可能性が示唆されている。

味覚刺激の提示から反応までの時間を味覚反応時間という[14]。味覚反応時間の計測では提示から感知までの時間であり、ボタンを押すなど観察可能な反応を元に算出している。味覚反応時間は何らかの味覚が生じるまでの時間を指す単純反応時間と、ある特定の味質を感じるまでの時間を指す複雑反応時間(味質反応時間)の2種類がある。しかし一般的に味覚反応時間は前者の単純反応時間を指すことが多く、同一の味刺激で比較する場合は単純反応時間のほうが約 150 msec 短いとされている[15]。また反応時間は刺激濃度、刺激強度および刺激面積が大きくなると減少するとされている。山本らはうま味以外の4基本味において、反応時間(T)、刺激強度(C)の間に  $T = a + b/C$  (a, b は定数) で示される関係が成立すると報告している。彼らの報告によると先端直径 4 mm のピペットで各溶液





## 2. 関連研究

を 3 ml 舌面に注いだときの味覚反応時間は、酒石酸 (0.5mol/L) は  $430 \pm 59$  msec, 食塩 (1mol/L) は  $433 \pm 86$  msec, ショ糖 (1mol/L) で  $652 \pm 98$  msec, 塩酸キニーネ (0.013mol/L) の場合  $750 \pm 158$  msec となっている.

味覚刺激も他の感覚器と同じく刺激への順応が起こりうる. 化学感覚である味覚と嗅覚は順応傾向が強いが, 両者を比較すると味覚は嗅覚ほどの順応は起こらないとされている. また, 味の感度には味覚溶液の温度も影響する. 山本らは基本味質溶液の温度と味の強さの関係を解明するために, 5 段階の温度に対し単純反応時間と味質の強度を測定している. その結果全般的に温度上昇に伴い感覚量が増大することが示されている. また, 塩味, 酸味, 苦味は  $25^{\circ}\text{C} \sim 35^{\circ}\text{C}$  間でもっとも味を強く感じる傾向が見られたが, 甘味と旨味は温度の上昇で感度がよくなると報告されている[16].

### 2.1.2 味覚修飾物質

味覚修飾物質は食品そのものを化学的に変化させずに, 味覚器のみに作用して食品本来の味の受容を変化させる. これまで甘味誘導物質・甘味阻害物質・苦味抑制物質などが明らかになっている. たとえばミラクルフルーツに含まれるミラクリンは酸味を誘起する水素イオンと結合し, 甘味受容体を活性化させる. そのため, 酸味を有するものに対して甘味を感じられるようになる. 同様の効果をもたらすものとしてクルクリンもあげられる. クルクリンはそれ自体が甘味を有するほか, 摂取後に水では 5 分程度, 酸味を有するものでは 10 分程度甘味を感じさせることができると述べられている. ただし熱や他のイオンの影響を受けやすい物質である[17].

上記 2 つは甘味誘導物質とされているが, 逆に甘味を阻害する物質としてはギムネマ酸, ジジフィン, ホタロシド, グルマリンがあげられる. ギムネマ酸は 10 分程度甘味を抑制する効果があり, ジジフィンはギムネマ酸ほどではないが, 30 分程度他の味質の影響を受けず甘味を阻害する効果があることが栗原らの研究で明らかになっている[18].





## 2. 関連研究

味覚修飾物質は栄養価を変化させずに味質のみを変化させるため、本研究の目的と非常に親和性が高い。しかし、味質修飾物質は一回の摂取による効果の持続時間が長く、本研究で目指すような即時的な制御は行いにくい。それに対し電気味覚は出力時とその直後に味質の変化を引き起こすことができる。とはいえ電気味覚では誘起されにくい甘味の制御が行えることから、本論文では対象としないものの併用して味質のみを制御する手法も考えられる。

## 2.2 情報科学技術の活用

### 2.2.1 嗜好とおいしさ

前節では味覚器の仕組みと受容構造について説明したが、人が感じる“味”は、味覚器からの伝達信号のみで構成されるわけではない。広義の意味での味は、各種感覚器や環境からの刺激の集合体である。栗原はおいしさがどのような刺激の影響を受けて認識されるかについて図 2.3 のように説明している[12]。味に影響する要素は、味や香り、咀嚼感覚、テクスチャや温度のような口腔付近で感じられるものだけでなく、色や光沢などの視覚情報や、食習慣、空腹状態と多岐にわたる。広い意味でのおいしさはこれらが互いに影響を与えあった上で形成されるものである。





## 2. 関連研究

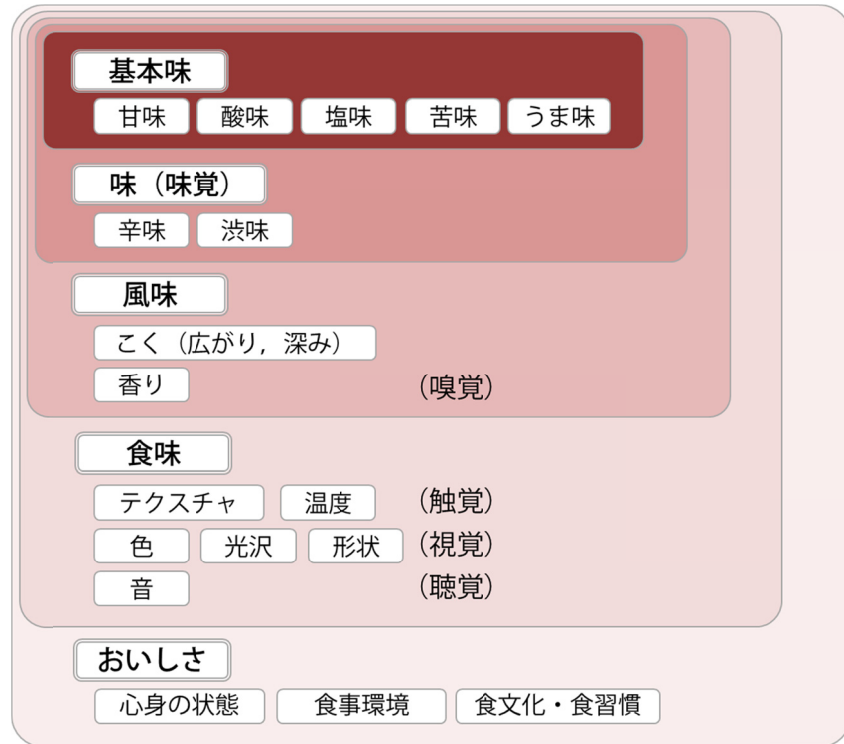


図 2.3 おいしさの構造 ([12] より一部修正)

また、味覚刺激を元に食品を嗜好するプロセスは多くの生物に見受けられるが、人における嗜好のプロセスは若干複雑である。伏木は味覚と嗜好における関係について議論する中でおいしさという要素を4つに分類している[19]。このうち必要な栄養価と紐づいて発生する生理的なおいしさは生物一般にみられ、油脂やだしの摂取でおこるやみつきになるおいしさも生物一般に同様の傾向があることを導きだしている。しかし、評価や他者からの伝聞などの情報から生まれるおいしさや、食文化によって食べなれたものをおいしいと感じる文化的なおいしさは人が特に発展させてきたものであると述べている。これらおいしさの複雑性によって、他の生物ではやみつきになるおいしさを持つもの以外は栄養的に充足すれば一定量以上摂取しないにもかかわらず、人はこの生理的な反応を超越して嗜好する傾向があることについて述べている。





## 2. 関連研究

### 2.2.2 他感覚への刺激出力

食にかかわる情報科学研究は、調理行動支援や共有、健康に向けたサポート、人間同士のコミュニケーションに主眼を置いた共食行為の分析と支援、飲食内容の記録と分析、提示技術などと多岐にわたる。これらの提案は、様々な分野から得られた知見を活用し、情報科学技術と融合させている。このような潮流に伴い、コンピューティングを対象とした特集記事の展開[20][21][22]、料理メディアを特集とする論文誌の発刊[23]、料理メディアや食メディア研究会の開催[1][2] など、食メディアに関する研究を推し進める展開も見られる。本節では、多岐に渡る食メディア研究のうち、飲食行為において食品の摂取や嗜好への影響を与えうる情報科学研究について紹介する。

前節で述べたとおり、広義での味は味細胞からの伝達だけではなく、視覚や聴覚、触覚、ひいては食環境まで含んでいる。特に他感覚への情報出力を活用する例は多く提案されている。たとえば視覚情報は五感のなかでも優位性が高く、飲食前の風味の推測や先入観に影響を与えるとされている。坂井らは、色が食物や飲料の同定、風味強度評定、おいしさ評定に影響を及ぼすことに着目し、視覚情報、特に飲料に関連する写真情報を提示する実験を行った。その結果、写真刺激が色刺激に比べより深い認知処理にかかわり、色刺激より大きな影響を与えることを示唆している[24]。

また数野らは、先入観が食品の味の想像に与える影響を対象とし、色の変化による見た目での味の想像、食後の味の判別について調査した。リンゴ・レモン・メロン・イチゴ・オレンジの味と香りを付与したゼリーを用い、それぞれを果実特有の色のほか、ダミー食2色に着色したもので評価実験を行っている。その結果、色と味、香りが一致しているゼリーと一致していないゼリーでは一致しているゼリーの方が高い正答率であったと報







## 2. 関連研究

告している．この原因については，色から想像する果物の味の影響が判別に影響を与え，一致していない組の不正解率を高めたと述べている[25]．

富田らは食事環境における後光効果（しつらえやテーブルクロスなどが料理を引き立てる現象）に着目し，特にテーブルクロスや皿の色がおいしさや心理に及ぼす影響について調査した．この研究では甘味に焦点をあて，官能調査を用いた色と甘味の関係，アンケートを用いた甘味に関する言葉と色の関係を明らかにし，甘味制限を必要とする場合などにおける快適な食空間の提案を行っている[26]．また森らが提案した Dining Presenter では，テーブルや皿の縁へ食材の補色を投影することで食材の色味を引き立たせる手法を提案している[27]．

嗅覚刺激も飲食に影響を与える．特に口腔内への匂い刺激出力は何らかの味を誘起させる場合があると報告されている．Paul らの調査によれば，人は狭義の味を示す“Taste”という単語と，さまざまな感覚から得られる広義の味を示す場合“Flavor”という単語を，文脈や食べ物の属性に応じて使い分けているとされている．そして口腔に出力された嗅覚のみ，または嗅覚と味覚へ出力された情報について表現するときに，広義の味を示す“Flavor”という単語で表現する傾向にあることが示唆されている[28]．

これらを複合的に活かした提案としては，鳴海らによる LED を用いた飲料への色重畳表示手法と[29]，重畳表示を用いたクッキーの擬似的味覚変化システム MetaCookie があげられる[30]．飲料への色重畳システムは，実際の飲料を味袋と呼ばれる袋の中に入れ，袋外側の液体を LED 光で照らすことにより飲み物が着色されたように見せることの出来るものである．この視覚情報の付加とともに香料を出力した状態での実験から，提案装置を用いることで実際に飲料を着色したときと同程度の味の変化を提示できることが明らかになっている．また，LED 光を用いた着色であることを活用し，LED の色を飲んだ経過時間に応じて変化させるなど，着色料での色づけでは不可能なインタラクションを加えられることを示唆している．





## 2. 関連研究

後者はHMD (Head Mounted Display) に取り付けられたカメラを用い、クッキーに刻印または印刷されたマーカーを基準として映像上のクッキーにさまざまな視覚情報を重畳表示している。同時に装置に取り付けられたエアポンプから送り出された空気にフィルタで匂いを添加して出力することでクッキーの味を擬似的に変化させている。またクッキーを食べる過程でマーカーの一部が欠損した状態でも、認識を続行できるような改良を行なっている。実験では、7 種類の表示情報と香りを提示したクッキーにおいて、良好に味の変化を感じさせることができることを発見している。

このような視覚刺激が与える効果を応用したものとして、飲食した利用者の満腹感に影響を与えるシステムも作成されている。この装置はHMD に装着したカメラで得られる映像から食品を認識し、見た目の大きさを画像処理によって変化させている。また、手で食品を持っている場合は手のサイズも同時に変化させている。システムを利用した実験から、画像処理による視覚的サイズの変化だけで、被験者の食事量を増減両方向に 10 %程度変化させられることが導き出されている[31]。

咀嚼感も食事のおいしさに影響を与える。これは触覚刺激や聴覚刺激が与える効果である。たとえば岩田らによる Food Simulator は、咀嚼時の圧力を出力する触覚インタフェースである。飲食物の認識が化学的、聴覚的、嗅覚的、そして触覚的知覚によって行われることに着目し、特に触覚的知覚に焦点を当てた提案を行っている。これは実際に食品を咀嚼した時の圧力変化を記録するセンサと、それを再生、再出力する機構をもち、歯に食物の触感を提示することができる。そして装置による触感の付加のほか、聴覚情報として咀嚼音、味覚情報として合成味物質を同時に提示している。この装置では、食品の硬さだけでなく、破断応力後の圧力波形、食品の変形をある程度再現できている[32]。

Zampini らは咀嚼中の音情報の重畳が食感の拡張に影響することを示唆している。実験ではポテトチップスを一噛みした時の発生音を取得し、計







## 2. 関連研究

算機でのフィルタ処理を加えた音を被験者が装着するヘッドフォンで出力した場合の食感変化について調査している。その結果、高周波成分の増幅または全周波数の音圧の増幅した音を出力することで、ポテトチップスのCrispness（サクサク感）が増強されることが明らかになっている[33]。増田らは食品咀嚼中に提示される聴覚情報、特に実際の咀嚼音と全く異なる音の提示による効果について検証している。2種類のプレッツェル（開封直後のものと湿気させたもの）を咀嚼させ、それを湿気ていると感じるかを強制二者択一法で回答させる実験を行っている。結果、ホワイトノイズの付加でプレッツェルの湿気度合いを減少して感じさせることができるといふ知見を得ている。

増田らは飲食中の食品と異なる食品の咀嚼音を提示した場合の食品判別確率についても実験を行っている。実験では、咀嚼時に動く部位である咬筋の動きを検出し、動きに合わせて音を出力する装置を用いている。装置を使用した状態で2種類の異なる食感を持つチョコレートの食品判別を行った結果、片方のチョコレートでは、異なる咀嚼音によって食品の判別に影響が生じたことが明らかになっている[34]。

小泉らも聴覚触覚間の感覚相互作用を活用した食感の強調または減損手法を提案している）。小泉らの装置では日常の食体験で飲食行為と発話行為の両方が発生することを鑑みて、咀嚼行為と発話行為を下顎の動作で識別し、咀嚼時だけ聴覚フィードバックを出力する機構を設計している。また、食べ物が咀嚼されるほど増幅する不快音をフィードバックしないよう、咀嚼回数にあわせた音響処理を加えている[35]。

山岡らは食材の食感を拡張することに焦点をあて、棒付き飴に対して様々な食感を付与するデバイスを提案している。システムは舐める動作を検出するセンサと振動を出力するスピーカーを有しており、装置に棒付き飴を装着することで、炭酸感などの食感を飴に出力することができる。また、装置で提示する食感として、普段味わうことのできないような食感を





## 2. 関連研究

作り出す試みも行っている[36]．また，食品を吸い込むときに感じられる吸引感覚を出力するものとして，橋本らによる Straw-like User Interface があげられる．この装置では吸引時の振動情報を記録再生し，ストローを介し唇に振動を与え，同時に聴覚情報も出力する．この刺激提示により実際の食材を吸い込んだような感覚が与えられるほか，唇への振動感覚と聴覚情報のみで利用者に何か食材を食べたような感覚が与えられると述べられている[37]．

これらの研究は，擬似的行為を含む飲食行為を行う過程で味覚・感覚または嗜好機能を制御している．また，その一部は過剰摂取を防ぐ目的を持つものもあり，本研究の目的と親和性が高い．これらの研究との差異は，主に刺激の出力対象となる．本節で紹介した研究は図 2.3 の分類の中では風味・食味・おいしさのカテゴリに入ると考えられる．それに対して，本論文で用いる電気味覚は，基本味には含まれないものの，味細胞を一定の割合で刺激すると考えられているため（2.3.1 に後述），図 2.3 の分類では風味・食味・おいしさよりも味（味覚）のカテゴリに近いといえる．

### 2.2.3 食品の加工

食品への直接的な加工や，化学的呈味物質の出力にとりくむ研究も見受けられる．分子調理学(Molecular Gastronomy)分野では，食材の特性や，調理時の加工によって起こる変化を化学的にとらえ，その変化を実験による検証などを踏まえてモデル化・レシピ化している．その応用事例の中には，調理時の加工によって風味を「閉じ込める」手法，食感や舌触りを変化させ風味を感じさせやすくする手法も見受けられる[38]．情報科学技術ではこれら化学的知見を活用したうえで，その出力・加工の制御性や操作性を向上させた提案が多く見られる．

2008 年，Patricia らは Ars Electronica で Eat a bit と題した展示を行っている．彼らは 2 次元，3 次元印刷システム，レーザーカッターなど





## 2. 関連研究

各種加工装置の使用によって、飲食可能な 2 次元, 3 次元オブジェクトの印刷や生状態と加熱状態を持つ食材を作成できるのではという発想から、可食インクを 2 次元または 3 次元的に印刷することができる技術の開発に着手している。そして出力例としてデンプンなど食材で作られた紙上に印刷することで、飲食可能な印刷物を作ることができるシステムを展開している[39]。

CandyFab プロジェクトでは形状作成素材に砂糖を用いた出力システムが提案されている。また、それらの形状を作成する CandyFabulous なるソフトウェアも提供している[40]。CandyFab は原材料の制限から単一の味を出力するにとどまっているが、化学物質を組み立てられるプリンタなどが開発されている[41]。提案では、インクジェットプリンタが正確なパターン生成や加工、製造に適していることを評価した上で、生物学や生体材料、感覚器の作成技術における従来の酵素や生きた細胞への直接的なプリント技術に変わる手法として活用できることを確認している。現段階では操作が複雑で、場合によっては細胞を傷つけることもあるとされているが、展開が進めば食品への応用も進むと考えられる。

3D プリンタの食品の 3 次元形状出力技術への応用も進みつつある。チョコレートなどは温度での出力・凝固制御が行いやすいため、すでにチョコレート出力用 3D プリンタが市販されている[42]。レイヤー上に層を積み重ねる方式の食品プリントは多く試作されており[43]、数種の食材を出力するもの、焼成後を考慮して出力するもの[44]などが提案されている。

また、食品に 3 次元形状を出力できるシステムとして大和田のゼリープリンターがある。これはゼリーの中に粒子を出力するもので、 $x \cdot y$  軸だけでなく、 $z$  軸への出力も可能である。大和田はこれを変形、切断、食べるといったインタラクションができる 3 次元形状生成システムとして発表している[45]。





## 2. 関連研究

その他にも、2次元ではあるがドライフルーツを出力できるプロッタを橋田らが開発しており、デザートのコレクションなどに使えることを提唱している。現段階で複数色の制御はできないものの、ドライフルーツを跳ね返すことなくなじませられる生地（杏仁豆腐やゆるめのゼリーなど）の上に描画できることを実験で証明した[46]。また、カフェラテの表面上にさまざまな模様を描く Latte art（ラテアート）と呼ばれる手法に対し、印刷技術を活用し表面上に描画する研究も存在する。これは既存の手で書くラテアートより複雑な表現を行うことができるものとなっている[47]。

また Dilrukshi らや Wei らの研究の中でも、利用者がデザインしたメッセージを、遠隔地にあるゼリー状の食品を出力する装置で提示するシステムを構築しており、食品を用いた出力を用いたコミュニケーションとして展開している[48][49]。Dilrukshi らは食が人々のコミュニケーションに活用されていることに着目し、利用者がデザインした形状の食品を遠隔地へのメッセージ伝達に用いるシステムを提案している。出力には 3D プリンタに類似した装置を用いており、一方がデザインした食品を遠隔地におかれた他方の出力装置でも出力できるようにしている。Wei らは食や食を介したコミュニケーションに活用可能なシステムを複数上げている中で、Dilrukshi らのシステムと同じような装置によるゼリー状の食品の出力手法を取り上げている。

レーザーカッターの切断、加工能力を局部加熱手法として用いた例が、福地らによる Laser-Cooking である。活用例として、画像認識でベーコンの脂身を認識し、認識された脂身だけを局所加熱する手法を提案している。これによって食材の自動調理が可能だけでなく、新たな食感を生み出せることを示唆している。また食材表面を局所的に焦がす、変質させるなどの手法で食材に文字や絵を印刷する手法を提示している[50]。

喜多らは Programmable Food の一環として、味溶液が事前に設定したタイミングで出力される Midas fork を作成している[51]。Dan らの Edible





## 2. 関連研究

bits では、ネットワーク情報などを味で出力する 2 種のシステムを提案している。複数ゼリービーンズを用いた情報提示装置は、ゼリービーンズを種類ごとに格納した筒を用い、メモリやネットワークの管理情報と対応付け、情報に応じてゼリービーンズを出力する。TasteScreen では、複数の風味を有する可食液体インクをディスプレイの上部に配置し、ディスプレイ表面に出力していくシステムを構築している。利用者はディスプレイを舐めることで、出力結果を確認できる[52]。

食品の加工や出力に関する技術は主に食品の調理工程での制御に貢献している。化学的視座から食を制御する試みや印刷技術の食分野への転用は栄養的な変化がなく味質を制御するような調理へ発展する可能性がある。Programmable food と Edible Bits はそれぞれ味溶液や可食液体インクを出力する機構を有しており、特に Programmable food では飲食時に食材に味溶液を出力することもできる。ただし、これらの研究で出力された食品または味溶液は、除去が難しく、可逆的な制御は行いにくいと考えられる。

## 2.3 電気味覚

電気味覚は Sulzer が 2 種の金属を舌面に乗せたことで発見されている。その後、Volta[53]をはじめ多くの研究者が追証を重ねている。本節では電気味覚について、まず受容や伝達、味質など基本的な要素について紹介する。次に大きな活用用途である電気味覚計の変遷と電気味覚検査の概要について紹介する。そして、味覚検査以外の電気味覚提示について紹介する。

### 2.3.1 発現機序

電気味覚の発現機序は、これまでに 3 つの説が提唱されている。Stevens らは 2008 年の論文で、電気味覚の発現機序はまだ確定はしていないと報告





## 2. 関連研究

している[54]．ただし，3つの説がこれまでに提唱されており，各説の妥当性について多くの研究者が議論を重ねている．

まず，Voltaによる追証当時に提唱されていた機序の予想は，舌を通過する電流が直接的に味細胞を刺激するというものである．この説は1971年にもBujasによって味細胞だけでなく求心性神経線維が刺激されるという説として支持している[55]．2つ目は船越らによって1980年に発表された電気泳動強制結合説である．これは舌表面上のイオンが電氣的刺激の提示によってイオン泳動するというものである．この説は一時期有力視されてきたが，Bujasらが短時間刺激で起こる電気味覚に対して整合性がないと反論している．そして大場も複数の実験から論破を試みているが，論破できうる結果は得られていない[56]．3つ目は，電位依存性カルシウムチャンネルへの刺激による脱分極と，そこからのシナプス伝達である．この説は1981年に柏柳らが支持している[57]．

脇が1993年に行った考察では，1つ目の説を電氣的刺激と化学刺激の機序が異なるとする説，2・3つ目の説は化学刺激の機序との共通性を支持することからなる説と説明している．そして，化学刺激はある程度特異的な繊維の興奮を伴うのに対し，電気味覚は非特異的に繊維の興奮が起こるという水越らの指摘を引用する形で，少なくともこれら3説がメカニズムとして考えられるほか，触神経線維の興奮も一部混入する可能性があると推測している[58]．

機序の解明を進める中で，電気味覚は化学刺激で誘起される味刺激や触覚刺激とも比較されてきた．1974年にはBujasらが化学刺激によって誘起される味覚では起こる適応反応が電気味覚にも見受けられるかを調査し，電気味覚が化学刺激か否かについて議論している[59]．また1981年にはCaredilloが触覚刺激，電氣的刺激，化学刺激の単一味蕾への提示から誘起される味質の比較を報告している[60]．これは茸状乳頭へ化学刺激(9種)，電氣的刺激(S4 stimulatorを使用，方形パルス提示，刺激導子を金，無







## 2. 関連研究

刺激導子を銀皿型にし，舌裏側に貼付け），触覚刺激（電氣的刺激と同等の環境で，通電のない状態）を提示し，味質の評価を行わせたものである．その結果，化学刺激が呈する味質については触覚刺激・電氣的刺激より複雑であるが苦味と酸味，塩味と酸味の間に混乱が起こりやすいことが報告された．それに対し触覚・電氣的刺激は，苦味や甘味が酸味や塩味と比較して弱く感じられるほか，塩味の応答については触覚刺激より電氣的刺激のほうが効力を発揮することを報告している．

2005 年には Lawless らが触覚刺激，電氣的刺激，化学刺激の呈示で感じられる金属味について評価を行っている [61]．ここでは鼻の開閉によるレトロネーサルと金属味との関係が示されており，硫酸鉄（Ⅱ）による金属味は鼻の開閉が影響するのに対し，電気味覚には鼻の開閉が影響しないことを報告している．

上記のように，現時点で電気味覚はその機序のすべてが解明されているわけではない．また，基本味のように対応する受容体が存在するわけではなく，味細胞や神経を非特異的に刺激していると考えられている．さらに触神経線維の興奮も一部混入している可能性があることから，基本味の中にも含まれないと考えられる．そのためたとえば栗原のおいしさの分類における位置づけとしては，基本味の次のカテゴリとなる味（味覚）に類すると考えられる．味（味覚）に含まれている辛味は温刺激受容体への刺激，渋味は各種受容体たんぱく質への非特異的な刺激であり，双方とも舌をはじめとした口腔の細胞を刺激するものである．電気味覚においても，味細胞をはじめとする細胞への非特異的な刺激であることから，味（味覚）のカテゴリがもっとも適していると考えられる．

### 2.3.2 味質と特性

電気味覚の味質は，電気味覚が確認されて以来，様々な研究者が提示条件を変化させつつ報告を繰り返している．1936 年の亀井の実験的調査の報





## 2. 関連研究

告[62]では、鉛筆の芯を電極にした個々の細胞刺激や、銀線電極、亜鉛-硫酸亜鉛電極、亜鉛-硫酸亜鉛粘土電極を用いた陽極及び陰極の味質などが調査されている。また、エチル塩酸キニーネ、塩化カリウム、硫酸マグネシウムに対して金属導子先に少量塗布し電気味覚を加えた様子も報告している。特にエチル塩酸キニーネに於いては希塩酸に溶かし（苦味を有する液体となる）底面を半透膜にしたガラス管に入れ、液体に電極を挿入した状態で、舌を半透膜に接触させ、陽極と陰極での味質について報告している。更に、食塩水をゼラチン 40g に溶かし凝固させたものの片面に半透膜を介して電極を接触させ、もう片面に舌面を接触させた状態での電氣的刺激の味質に対する報告では、金属電極とほとんど同じであると報告している。味の素溶液（5～10%）を用いた実験では味の素溶液を注いだ容器の中に銀線電極とガラス管（中にガーゼ束が詰められている）を挿入し、手に電極を、舌にガーゼ束からの刺激を受ける形で、陽極と陰極の味質について報告している。その他、コカイン麻酔時では電気味覚を感じにくい、交流では振動感覚を有する場合があることも述べている。

1958 年、Krarup らは 140 名の被験者で舌の左右、前後での閾値調査を行い、電気味覚の知覚が Stevens のべき法則に従うと報告している[63]。また、1964 年には Georg が電気味覚での甘味誘発について評価しており、パルス波の周波数とパルス幅を変化させることで引き起こせる甘味、酸味、塩味、苦味の関係をグラフにまとめている[64]。

同様の評価として、1968 年にも、Helmbrecht が電気味覚の味質と強度について実験を踏まえ言及している[65]。Helmbrecht は方形波を  $20\text{mm}^2$  銀電極で提示した際に甘味、酸味、塩味、苦味に相当する味質を感じられたことを報告した上で、味質の種類にかかわらず感覚量と刺激量が Stevens のべき法則に従うことを追証している。また電気味覚と化学感覚では指数の値が非常に近いことを述べている。これらの実験時点ではべき法則に従う







## 2. 関連研究

と判断されていたが、以後電気味覚にも Weber-Fechner の法則が当てはまるという解釈がなされている。

1971 年、富山らは日本人の電気味覚の閾値の年齢変動、標準閾値、正常範囲、性差、左右差、味質について、彼らが作成した電気味覚計 TN-01 及び TR-01 を用いて評価している [66]。1979 年には高橋らが再度日本人の電気味覚における正常値を、TR-01 の改良機である TR-05 を用い報告している [67]。

Hermess は 1985 年、ラットにおける陰極刺激停止時の味覚神経応答について調査している [68]。これまでの調査は主に刺激提示時の反応に注目して評価をおこなっているが、Hermess らは陰極異刺激提示時の応答レスポンスが飽和応答レベルまで上昇することを報告している。またこの応答レスポンスは電流強度  $20 \sim 120 \mu A$  で起こる応答が電気泳動によるイオン移動ではなく基底膜への直接刺激ではないかと述べている。その他には、Ajduković は 1990 年に電流強度と電流密度のどちらが電気味覚の味質強度に影響をあたえるのかについて議論している [69]。

電気味覚の反応時間は山本らが電気味覚計を用いた味識別反応時間として報告している。 $4.2 \sim 406 \mu A$  の直流刺激を 1.5 sec 与えたときの反応時間 (T) は、電流の大きさ (I) を刺激の大きさとしたときに、化学刺激の場合 ( $T = a + b / C$  : C は刺激強度) と同じく  $T = a + b / I$  となるという見解を述べている [70]。

上記の通り、電気味覚の味質は様々な実験条件で調査されている。実験対象や環境、味質の表現に多少の差異はあるものの、金属味・苦味・酸味・塩味がよく感じられること、極性によって味質に差異があることが述べられている [71]。ただし、出力手法によっては、甘味も提示できることが発見されている。本論文で作成する装置で付加できる味質は、これらの研究で調査されているものに非常に近いことが類推できる。また食品へ付加した際の効果も亀井の実験的調査が参考になると考えられる。ただし、出力





## 2. 関連研究

面積に依存する味質の場合、本研究で電極として用いる食品の面積が一意に定まらないため、活用できない可能性も考えられる。その上で本研究は、食品に付加した時の味覚機能の制御にどのように貢献できるかを検討する必要がある。

### 2.3.3 電気味覚計

1958 年に Krarup が電気味覚検査の手法および電気味覚計を提案して以降[72]、電気味覚の活用用途のほとんどは電気味覚検査となっている。Krarup の電気味覚計はベキ法則を考慮した対数目盛 (Electric Gust Unit) を有しており、提示刺激は直流／陽極刺激、刺激導子はステンレスチール、無刺激導子は布片を食塩水で濡らし、手に固定させたと報告している。

この提案を元に、電気味覚による味覚検査は簡易で迅速に行える味覚検査手法として注目さじめた。そして複数の臨床応用報告及び電気味覚計の改良が報告された。まず 1959 年の Feldmann らが、Krarup の提案した装置の電源部を交流電源に変更し、刺激導子には錫メッキ素材を採用した装置を作成している。[73]。1962 年に Harbert らは機器構成に電流計による表示を付け加え、検査時に電流計の値を元に制御する方式の電気味覚計を作成している[74]。また、1964 年には Pulec らが刺激導子に舌を挿入する形の改良を行っているが[75]、1965 年に Bull らが Herbert 型を改良し交流を整流して用いる型では Krarup の提案と同じく、棒状・銀電極の導子を用いている[76]。その後、富田らが Krarup らの電気味覚計を改良した TN-01 型を提案し[77]、調査を行った上で、刺激電流、提示電源、刺激導子の形状、刺激導子の素材、刺激時間、無刺激導子の状態、回路抵抗について議論し、TN-02 型を作成したことを同報告内で述べている[78]。

その後 1979 年に高橋らの実験で用いられた TR-05 型は富田らが提案した TR 型の改良版だが、トランジスタ回路により舌一皮膚抵抗間の変化をフィードバックとして返し電流量を一定に保つ機構を有している[67]。21 ステ





## 2. 関連研究

ップ対数表示がなされているほか，無刺激導子の提示位置が手または腕から首へと移動している．これは医用電気機器の規格である ME (Medical Electronics) 規格申請のための変更であり，本装置提案後の電気味覚を用いた味質調査研究では，無刺激導子を手または腕に提示する例も見受けられる．また同年には，この装置とは他のアプローチとして，Lucarelli らはローコスト，ポケットサイズ，電池駆動可能で持ち運びできる電気味覚装置を提案している[79]．現在では一般的では TR-05 を更に改良した TR-06 が使用されている（図 2.4）．

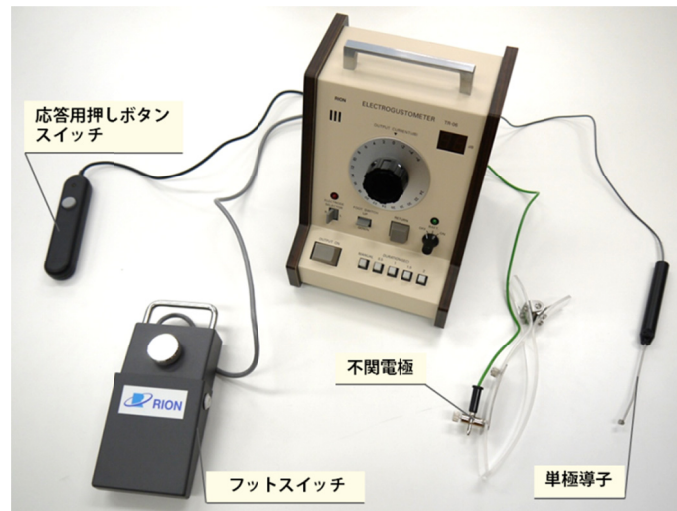


図 2.4 電気味覚計 TR-06

これらの電気味覚計を用いた検査は一般的に実験者が機器を操作し，被験者に指示しながら検査を行う．それに対し，2000 年に Stillman らはコンピュータ制御による電気味覚検査の自動化を検討している．この研究では陽極刺激を出力する端子を 2 つもつ刺激導子を作成しており，刺激導子を動かさずに舌の左右両側を刺激することを可能にしている[80]．

電気味覚計は本来味覚検査用機器として構築されているが，疾病や障害の病状検査，予後診断のための臨床的意義も見出されている．1968 年には三吉らが臨床味覚検査法の一つとしての電気味覚検査について言及し[81]，





## 2. 関連研究

同年に柳原らも臨床的意義として、鼓索神経部位の手術に対する術前検査、顔面麻痺における部位判断と予後判定、聴神経腫瘍の診断に活用できると述べている[82]。また富田らも同年の電気味覚計改良に関する報告の中で顔面神経麻痺に対する判断において臨床的に活用していること、聴神経腫瘍の診断に活用できることに加え、Bell 麻痺における臨床的な調査の意義を報告している[78]。

### 2.3.4 脳情報処理

1994 年に北奥らは CNV (Contingent Negative Variation: 陰性随伴運動) を用いた電気味覚検査の客観化について評価している[83]。CNV は警告刺激と命令刺激という一対の刺激の間に起こる神経活動電位であり、警告刺激から命令刺激を予期する際に発生することが確認されている。この警告刺激を電気味覚に、命令刺激を純音として提示し、脳波の正中中心部 (Cz) の事象電位を記録している。同時にこの研究では両極型直流刺激提示用の電極を用意しており、電気味覚検査の手法との比較を行っている。

CNV を用いた調査は 2000 年にも行われており、警告刺激を電気味覚 (TR-06 を使用) とし、命令刺激を光刺激とした状態で CNV を計測している[84]。計測からは CNV 閾値と自覚的味覚検査閾値の間に高い相関があることと、閾値の差が CNV に関する知識がある被験者群とない被験者群の間で小さいことが導出されている。そのため、CNV を用いることによって被験者自身の自覚的な味覚検査ではなく、他覚的な味覚の検査が行えると述べている。

2005 年の虫本らの研究では、7 種類の時間長の電氣的刺激を舌面の鼓索神経、舌咽神経、大錐体神経領域に対し提示しており、その際の刺激時の閾値・味質を調査するとともに脳波計測を行っている。脳波計測のための電極配置と数はもっとも一般的である国際 10-20 法にならない、頭皮を 10% もしくは 20% の等間隔で区切り、計 21 個の電極配置位置を決定している





## 2. 関連研究

[85]. その結果から、閾値が有意に高くなる提示時間長は鼓索神経で 100msec, 舌咽神経で 120msec, 大錐体神経領域で 200msec 以下であり, これ以上短いと味覚的に感知しない被験者が増加することを報告している. また脳波においては, 200~300msec の 第 1 陽性波, 240~320msec の第 1 陰性波, 350~500msec の 第 2 陽性波に反応が見られている. この内第 2 陽性波は味覚刺激が感じられない時には活性化しないと報告されている.

1989 年には二宮らがラットの神経をプロカイン麻酔した状態での味覚応答について調査している. この調査では 4 種の化学刺激と陽極刺激, 温冷刺激を麻酔前, 麻酔直後, 麻酔 30 分後に提示し, 味質の評価を行っている [86]. その結果, プロカイン麻酔では電気味覚のみ麻酔直後に抑制されていることを報告している. これら調査の報告として, 陽極刺激がもたらす鼓索神経応答は味細胞を通じて発生しており, 少なくとも一部は化学味覚刺激受容と同じプロセスで処理されている可能性があると述べている.

2001 年には脳の活動から電気味覚の処理を調査する試みを Barry らが行っている [87]. Barry らは舌の左右に電気味覚刺激を与え, その際に起こる脳活動を fMRI で記録している. その結果, 電気味覚によって誘起される脳血液動態応答は, 体性感覚による反応に比べて味覚刺激による反応に類似していることが報告されている.

### 2.3.5 情報提示

電気味覚は長い間検査用途としての活用法が一般的であった. しかし, 近年, 新たに感覚情報の代替提示技術や味情報の提示技術として用いたものが提案されている. Wicab 社の Brainport は, 視覚障害者への代替的情報提示のために, 舌面への電氣的刺激の提示を用いている. この装置はマトリックス状に配置された 400 個の電極を有しており, カメラからの視覚情報にあわせて該当電極から電氣的刺激を提示している. そのため, 電極部を舌面に当てることで, 電氣的刺激による感覚提示でオブジェクト形状







## 2. 関連研究

などを知覚することを可能としている．装置は可搬性に優れるほか，10 時間程度の訓練で完全に視覚を失った利用者が物体の形状を認識できるという成果を導出している[88]．

また，上記の装置は，視覚障害者向け端末として開発が進められているが，応用的用途として，手術行為中の情報提示への活用も見込まれている．実験では超音波映像を活用した腹部手術を模した作業を想定し，超音波映像から得られた位置情報を 2 次元に変換し，提案装置で提示している．実験の結果，被験者が学習により舌からの情報を理解できることが明らかとなっている．このことから視覚的な情報が飽和し，両手で作業をするような状態において舌の敏感さや弁別性の高さを活用できることが示唆されている[89]．

このような電氣的刺激による舌への情報提示を，味情報の提示手法として活用したのが Nimesha らの Digital Taste Interface で，電氣的刺激と温度刺激を用いた味感覚のデジタル刺激手法を提案している[90]．この提案では，本論文と同じく電氣的刺激，ひいてはそこから誘起される電気味覚が活用されている．作成した装置を用いて Georg らが導出した電気味覚を用いた 4 基本味の提示と同等の提示を行えるようにした他，温度刺激と組み合わせることで，提示される味質の精度を補完している．彼らはこれらシステムを味の仮想再現装置および遠隔地での味情報共有システムとして構築している．この装置の電極部は，電気味覚計の Pulec 型の刺激導子[75]などのように，舌に直接両極の電極を当てる形を持ち，舌を挟みこむようにして刺激を提示する使用法を幾つか提案している．

本節で紹介した研究は，検査目的での活用が主軸となりつつあった電気味覚に対し情報提示としての活用を提唱している．特に Nimesha らの研究は，本研究と非常に親和性があるものと考えられる．差異は，Nimesha らの研究が味を仮想的な再現を目的に電極を直接舌面に当てて刺激を提示し





## 2. 関連研究

ているのに対し，本研究は飲食行為や食品の機能の拡張を目的に味質を食品に付加して出力する点である．

## 2.4 安全性に対する配慮

### 2.4.1 人体への電氣的刺激出力

人体への電氣的刺激の出力は多くの分野で行われている．これは神経間の刺激伝達が電気信号で行われ，外部からの電氣的刺激の提示でこの伝達中の電気信号に対し影響を与えられるからである．たとえば自動体外式除細動器（AED）は，心室細動が起こった際に，適切な間隔で電氣的刺激を提示することで，心臓の拍動を正常な状態に回復させることができる．感覚器への電氣的刺激提示と刺激による感覚や動作の誘起手法としても，人工視覚システムや人工内耳システム，機能的電気刺激を活用した動作制御[91]や電気触覚システム[92]などの提案が行われている．

しかし，逆に電氣的刺激が人体に心室細動などの副作用を及ぼすこともある．具体的には，心室の刺激退縮時（T波発生初期）に心臓に対し外部電源から十分な大きさの電流が流れこむことで，周期動作として行われている心臓の動作が不規則になる．そのため，電気機器，特に医用機器としての安全基準は，心室細動の発生条件を下回ることが求められる．この際，最大許容人体電流は電流値，通電時間，人体内部の電流通路，及び電氣的刺激の種類によって異なる．

図 2.5 は左手を陰極，両足を陽極とし，直流電流を通電させた場合の人体許容電流である．電流の種類においては，直流のほうが交流に比べ危険度が低くなっている．ただし，直流の場合，通路と心臓の方向関係および極性も影響を与える．具体的には左手から右手，のように心臓を横切る場合は，心室細動は起こりにくく，極性の差による影響度の違いも発生しな





## 2. 関連研究

い。しかし、左手から両足などのように、心臓に対し縦方向へ電流が通過するときは極性によって閾値が変化する。それに対し、極性を反転させた状態（左手を陽極、両足を陰極とする）では、図 2.5 の 2 倍の値が閾値となる[93]。

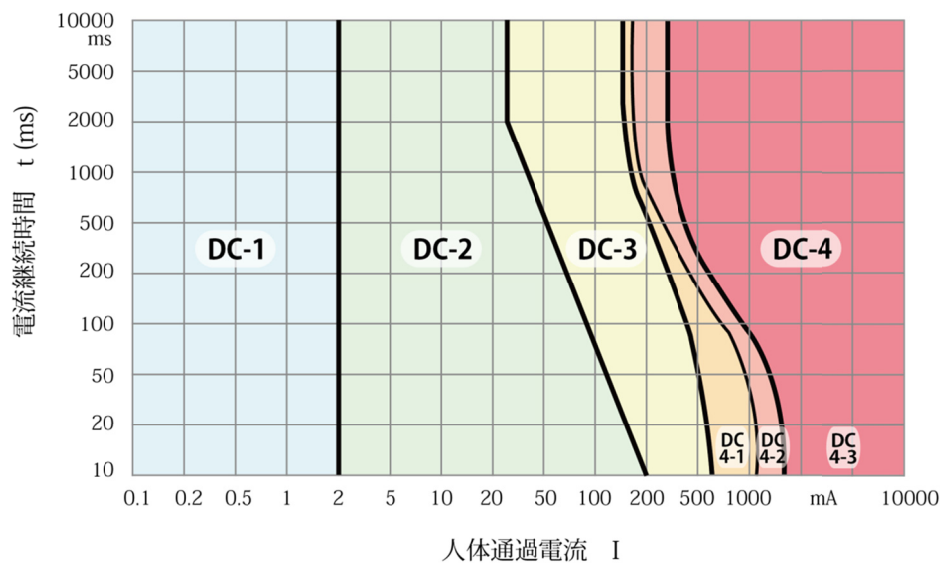


図 2.5 人体通過電流と安全・危険域

### 2.4.2 電気味覚計の電氣的刺激提示機構

電気味覚計の出力電流は、検査用途の観点から  $4\mu\text{A}$ ～ $400\mu\text{A}$  とされている。また、装置内部に人体の負荷抵抗を無視できる容量の内部抵抗を設け、個人間の人体負荷抵抗の影響を受けない配慮を行うか、定電流回路を用いて人体負荷抵抗を無視できる構造にすることが求められる。

また、電気味覚計として現在一般的に用いられている TR-06 は無刺激導子（皮膚接触電極）を首部に配置している。これは医療用機器としての設計のためである。それまで多くの電気味覚検査は無刺激導子を手で握る形をとっており、富田らは無刺激導子を手で把持する状態で、数万回の検査を行った中で、副作用は見られていないと報告している[94]。







## 2. 関連研究

### 2.4.3 本研究での配慮

人体への電流刺激で引用した各種の基準は、基本的に両電極が皮膚表面に接触している環境を元に設定されている。また、電流通路も、日常の機器使用時に起こりやすいと考えられる通路が基準となっている。提案装置も、電氣的刺激を人体に提示するので考慮する必要はある。ここで留意すべきは、電気味覚の出力に関する装置の場合、一極または両極が口内に提示される点である。そのため、本研究では一般的な人体への電氣的刺激提示の指針よりも、電気味覚計の出力強度や設計を参考にするのが好ましいと考えられる。

ただし、本論文で試作する装置は医用機器としてではなく、飲食行為中に用いる装置として提案を行う予定である。現行の電気味覚計では医用機器対応の一つとして皮膚表面側電極を首部に固定している。しかし、前節で述べたように手で把持する電極を用いた数万回の検査を行った中で副作用が発生していない。またこのような電流通路は中森らの食ベテルミン[95]や門村らの Sensing Fork[96], また HapiFork[97]でも採用されている。そのため、飲食行為中に用いる装置としての形状・機能に合わせて、首部だけでなく手で把持する形も検討可能という前提の上で設計を行う（第3章に後述）。

本提案は、飲食物への通電を行う。この通電が直流の場合、出力される電圧によっては電気分解が起こる可能性も考えられる。舌面上の唾液でも出力刺激によっては起こりうるものではあるが、電気味覚計ではこの点についてほとんど言及されていない。理論上で電気分解が進行する電圧である標準電極電位は水で 1.23V、食塩水で 2.19V である。ただしこれはあくまでも理論値であり、実際に反応を引き起こさせる場合、それ以上の電圧が必要となる。そのため、舌と電極間の電圧を 1V 以下とすれば、舌面での電気分解や析出物の発生は起こりにくいと考えられる。





### 3. 電氣的刺激付加装置の試作と検証

## 3. 電氣味覚付加装置の 試作と検証

本章では、食品がもつ味質に電氣的刺激による味質を付加する手法について検討する。本論文では味刺激の即時・可逆的な制御と、その制御を用いた飲食行為および食品の機能の拡張を目的としている。その中で、筆者は電氣的刺激による味刺激に着目し、栄養価を変動させず味質のみを変化させる手法として用いることができると考えた。その仮説を実証するには、食品が持つ味質に電氣的刺激による味質を付加したときの効果について実際に調査し、検証する必要がある。また、電氣的刺激による味質を食品に付加したときの効果、特に味質制御における効果は飲食行為によって食品を摂取しないと知覚されない。そのため、まず飲食行為を介して食品が持つ味質に電氣的刺激による味質を付加する手法を構築する。次に検討要素を元に試作した装置を用いて味覚反応時間と、極性変化による味質の差異について検証する。最後に検証の結果を踏まえ、装置がもつ味質変化の制御性について議論する。

### 3.1 装置のデザイン

電氣的刺激による味質の変化は口内に電氣的刺激が出力されていた時に感じられるものである。そのため電氣的刺激の出力によって味刺激を誘起するためには、舌を介した通電を行う必要がある。しかし食品が発電や蓄電できない限り、刺激の元となる電気を事前に食品に付加することはできない。そこで本研究では口内に含んでいる食品を介して電氣的刺激を出力し、舌面に接触させることで食品の摂取に合わせた電氣的刺激による味





### 3. 電氣的刺激付加装置の試作と検証

質の変化を制御する．そのため食品と電極が接触すること，そして食品が舌に触れた時に舌を介した回路ができることが求められる．

ここで求められる構造は電極を舌面に接触させる電気味覚計にも類似する．しかし，本研究で提案すべき装置と電気味覚計は，想定される使用環境と使用用途が異なる．現在主流となっている電気味覚計の電極は棒状であり，先端に金属が配置されている．また他の電気味覚計では舌を挿入するような電極も見受けられる．これら電気味覚計の電極の形状は，あくまで電氣的刺激の提示を安定かつ効率よく行い，味覚検査を円滑に行うために改良されている．もちろん飲食行為を前提とした環境や用途は考慮されていない．本研究では飲食行為に伴った電氣的刺激の出力を行うことを前提としている．電気味覚計のような棒状の電極を用い，その電極を口に含みながら食品を摂取するとなると，楊枝のようなもので飲食できるものに限られるだろう．また同様に，舌を挿入するような電極も電極と舌との間に食品を配置する形となってしまう，食品を口に含んだ後に行う咀嚼が行いにくいいため飲食時に用いることは考えにくい．

本研究では，電氣的刺激出力を行う環境が飲食行為中であることを鑑みて，食器の形状及び機能が電極部及び装置のデザインにおいて参考になると考えた．人は飲食行為の際に手または食器を用いて食品を口に運ぶ．とくに食器は把持しやすいような部分を設けることで，飲食行為を行いやすくしている．そのため，本研究では電極の形状として食器の形を踏襲したデザインを行うことが，食品への電氣的刺激の付加に適していると判断した．ここでの食器はまず食品を口に運ぶことを目的として作られたものを対象とし，食品を盛り付ける用途としての皿などは含めないこととした．

## 3.2 試作装置の構造

本節では試作装置の構成について紹介する．本研究の試作装置は，食料用としてフォーク，飲料用としてカップを対象とし構築している．フォー





### 3. 電氣的刺激付加装置の試作と検証

ク型・カップ型の装置はそれぞれ食料用・飲料用の一例であり，構造は食品を口に運ぶことを目的として作られた他の食器へも転用可能である．

電気味覚付加装置は，電極部分が食品と接触することが求められる．このとき，たとえば食料であればフォークやスプーンなど，金属製の食器を電極として用いることができる．それに対し，飲料においては金属製のカップを使うことも考えられるが，舌をはじめとする意図としない部分との接触が生じ，本研究の意図に沿わない提示が起りやすくなる．そのため，本研究の試作装置ではストローに電極を挿入し，飲料と接触させる手法を提案する．またこのとき，接触した食料および飲料が常に通電する状態にあると，電気分解が助長される可能性がある．そのため，印加される電圧に配慮するとともに，ほとんどの装置で飲食した時のみ回路が形成されるような仕組みで構築している．

#### 3.2.1 両極型装置の構造

両極型の電気味覚付加装置を作成するためには，陽極・陰極の両方が飲食物を介して舌面と接触する形状が求められる．食料用の両極型装置は，たとえばフォークの先端部のみを金属とし，左先端と右先端に電極を配置する手法も考えられる．または，フォークなどの金属食器 2 個をそれぞれ陽極電極，陰極電極として用いる手法があげられる．

本研究では後者の金属食器 2 個を用いる手法について紹介する．この場合，フォークのそれぞれに，陽極電極と陰極電極を固定し，電極となるフォーク同士の間を絶縁する．さらに把持部が手に接触しないように，把持部にはカバーを取り付ける．この両方のフォークを食料に刺して食べることで，食料を介して電気味覚が舌面に出力される．ただしこのとき両極が食料に挿入されるため，電氣的刺激が出力された時点で通電が起る（図 3.1）．そのため，不必要な通電を避けるためには何らかの飲食検知および出力を制御する機構が必要になると考えられる．



### 3. 電氣的刺激付加装置の試作と検証

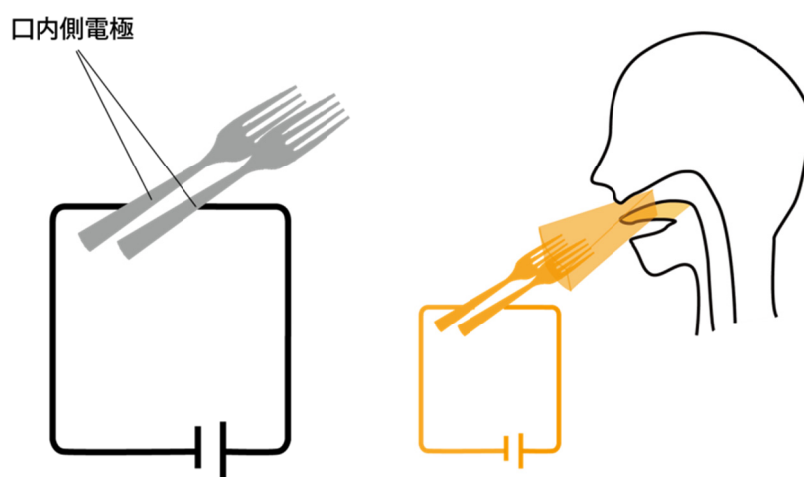


図 3.1 食料用両極型装置の概観と仕組み

飲料用の両極型装置は、陽極電極、陰極電極を飲料にそれぞれ接触させるために、2 つに分割した飲料容器に飲料を入れ、容器のそれぞれに 2 本のストローを挿入する形状とした（図 3.2）。2 本のストローにはそれぞれ陽極電極、陰極電極が挿入される。2 つに分割した容器は別々に持って飲むことが難しいため、2 つの分割容器が入るようなカップを用意した。

### 3. 電氣的刺激付加装置の試作と検証

この装置は使用者が飲む行為を行うまで回路が形成されない仕組みとなっている。回路は使用者が2本のストローから両容器内部の飲料を飲むことで完成する。

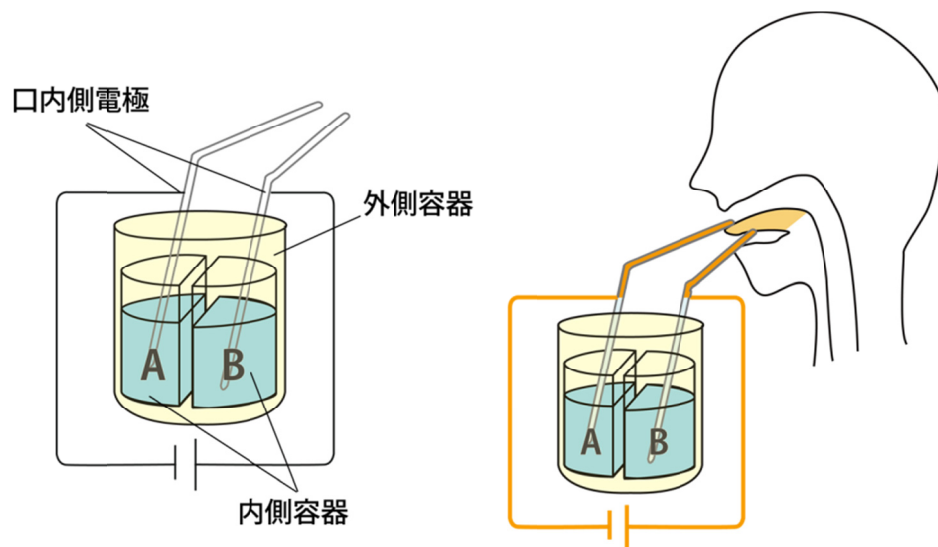


図 3.2 飲料用両極型装置の概観と仕組み





### 3. 電氣的刺激付加装置の試作と検証

#### 3.2.2 一極型装置の構造

一極型の電気味覚付加装置を作成するためには、電極の片方のみを飲食物を介して舌面と接触させる必要がある。このとき、もう片方の電極は舌面以外の人体の任意の箇所に接触させる必要がある。現行の電気味覚計では、首部に固定する電極が用いられている。これは電流通路を狭めるためにとられた方法だが、先に述べたとおり、これまでの多くの電気味覚計や検査では手に電極を握らせる、固定させるといった手法がとられている上、その手法での副作用の発生がないことも報告されている[94]。そのため、本研究の試作装置では、食器の把持部に皮膚表面接触用電極を配置する。

食料用一極型装置の口内側電極はフォークを用い、皮膚表面側電極はフォークの把持部に貼り付けた銅箔テープに接続する形とした（図 3.3）。把持部は口内側電極となるフォークおよび可変抵抗部が収納でき、さらに皮膚表面側電極と口内側電極を絶縁させる必要があるため試作装置ではフォーク外装を図のように構築し、回路部分およびフォーク把持部を格納した（図 3.4）。

試作装置は銅箔部を把持することで皮膚表面との接触が確保される。そして把持しながらフォークで食料を刺し、舌面に接触させると回路が形成される。本装置を用いて食料を食べると、フォークに刺した食料、口内、そして腕を介して電気回路が生成され、食料を介して電氣的刺激が出力される。これも、把持部から手を離すか、飲食を中断しているときには電氣的刺激の出力が停止する形となっている。出力は電源部での制御も可能だが、本装置は回路に可変抵抗器（スライダ）を設けている。これは装置の機能としては個人の味覚感度に合わせた調整を行うために加えたものであるが、同時に利用者が刺激に対して不快感や違和感を覚えた際に即時に調整する際にも用いることができる。



### 3. 電氣的刺激付加装置の試作と検証

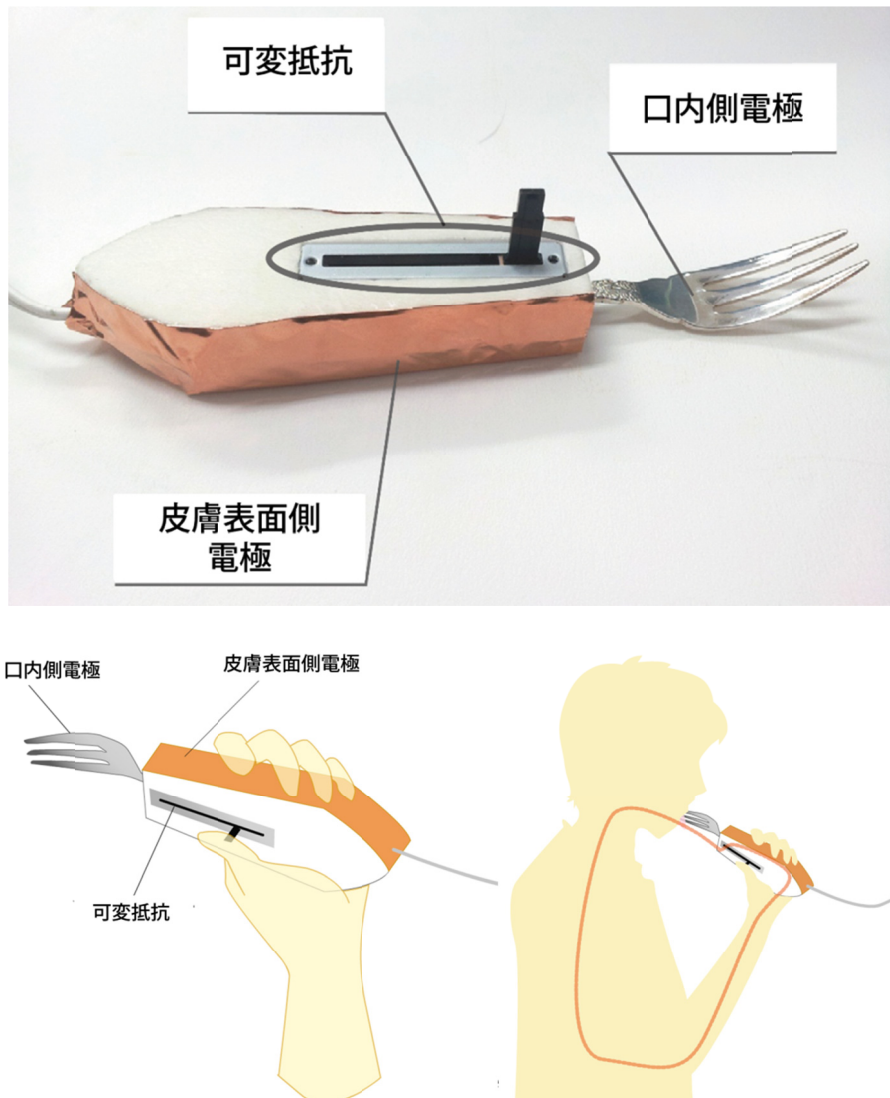


図 3.3 食料用一極型装置の概観と仕組み

1 層目には出力変更を行う可変抵抗器（スライダ型）をはめ込むため上部に 2mm 程度の余白を残し，長方形にくりぬき加工を施している．2 層目は可変抵抗器（スライダ型）と接続される配線を半田付けした基板を固定するため，上部からスライダとほぼ同じサイズに切り抜き，切り抜いた断面に基板を差し込むための溝を設けている．最下層である 3 層目は，フォークを収納するために内側表面をボードの半分まで削るとともに，皮膚表





### 3. 電氣的刺激付加装置の試作と検証

面側の銅線を把持部となる外側表面に配置するための穴を開けている．フォークには口内側電極を取り付けた上で，把持部容器の中で可変抵抗部などの配線と接触しないように柄の部分に絶縁した．フォークおよび可変抵抗器（スライダ型）を3層のスチレンボードにはめ込み3層を重ね合わせた後，3層目の外側表面と各層の側面部に銅箔テープを貼り付けている．このとき，3層目の外側表面が皮膚表面側の銅線と接触していることを確認する．

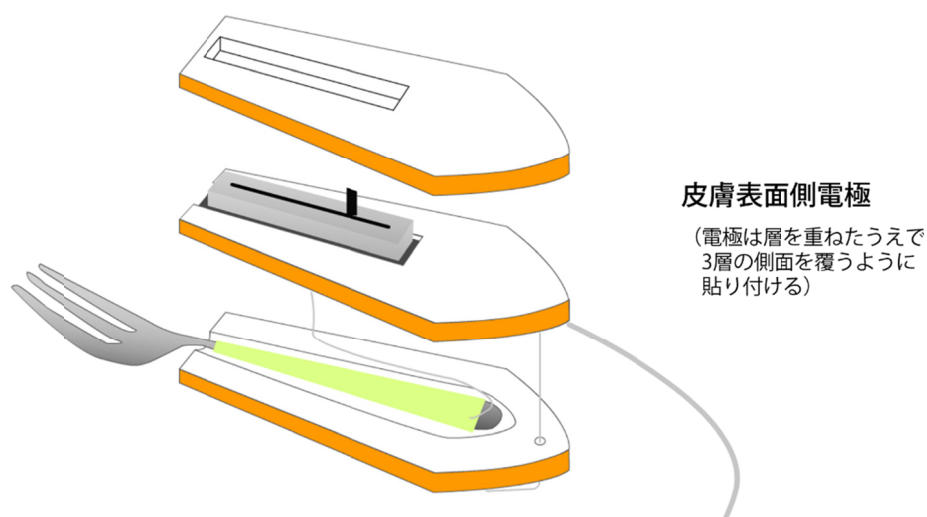


図 3.4 食料用一極型装置の内部構造

飲料用一極型装置も，食料型装置と同じく電極の片方のみを飲食物を介して舌面と接触させる必要がある．飲料用一極型装置では口内側電極は金属電極のストローへの挿入とし，皮膚表面側電極は容器の把手や表面部に貼った銅箔テープに接続する形とした．銅箔部を把持して飲料を飲むと，ストロー内を流れる飲料，口内，そして腕を通して電気回路が生成され，電気味覚が付加される．これも食料用と同じく把持部から手を離すか，飲食を中断しているときには電氣的刺激の出力が停止する形となっている．また，飲料用装置と同じく，個人の味覚感度に合わせた調整や不快感，違和感を覚えた際の即時の調整のために回路内に可変抵抗器を設けている．



### 3. 電氣的刺激付加装置の試作と検証

また, 体験者はこの可変抵抗器を用いて出力の ON/OFF および強度を任意に変更することもできる (図 3.5) .

容器は装置配線と飲料の接触を避け, 飲料交換を簡易にするために, 皮膚表面側電極となる銅箔や可変抵抗器を設置する外側容器と, 飲料を注ぐ内側容器に分割した. 試作装置では外側容器は市販の塩化ビニル製コップを用い, 内側容器は市販の紙製コップを用いている. 外側容器は内側容器より大きいサイズのものを用いているので, 外側容器に内側容器をはめ込んで使用できる.



図 3.5 飲料用一極型装置の概観と仕組み



### 3. 電氣的刺激付加装置の試作と検証

## 3.3 試作装置の検証

前節では試作した付加装置の構造について述べた。本節では装置がどの程度電気味覚の出力を制御できるかについて議論する。これはたとえば意図した状態で電氣的刺激を提示できるか、付加している食品の味の味覚反応時間と比較してどの程度の差が生じるのか、そしてどの程度の味質が付加できるかなどがあげられる。亀井の報告でも味の素溶液や寒天を用いた実験がおこなわれていたが、目的が味質の調査であり制御性能を対象としていないため、本節で検証する。

付加装置の付加能力を類推するに当たっては、第2章で述べた味や電気味覚における知見が踏襲できる可能性がある。しかし、これまでの研究では主に金属を直接接触させた上で得られた知見が多い。金属と食品は異なる組成を持つため、食品を電極とした場合に先行の知見が当てはまらない場合もあれば、食品だからこそ起こりうる味質の変化などもあるだろう。

ただし、食品は材質として分析すると「ほとんどの場合水を分散媒とする不均一な多成分分散系」であり、固体、液体、気体というあらゆる状態で存在するほか、その相や構造がほとんど特定できないもの[98]とされている。そのため、全ての食品の組成や構造を分析し、電気味覚付加時の効果を求めるのは本研究の範疇を逸脱する。しかし、一定の精度で付加による効果が活用できることを導出することは有益である。そのため、本研究では対象を限定した状態で、先行する知見と同等またはそれ以上の付加能力が得られるかを検証する。

まず、付加している食品の味の味覚反応時間と比較してどの程度の差が生じるかについて検証する。これら味覚反応時間の差を検証することで、電気味覚による味質を食品に付加する機構を構築する際の指標を導出することができる。





### 3. 電氣的刺激付加装置の試作と検証

次に、付加する味質を変化させられるかである．たとえば第2章で紹介した Nimesha らの研究では、うま味を除く4基本味の提示が行える可能性が示されている．しかし彼らの研究では、電極を直接舌面に接触させた上で、電氣的刺激に加えて温冷刺激を提示することでこれらの味を誘起させている．本提案の場合、先にも述べたように食品が電極となるため、Nimesha らの研究のように提示箇所を限定できない．また、食品の温度を変化させる機構を追加することはできるが、熱伝導の速度が推測しやすい金属と異なり、食材は種類によって様々な熱伝導性を持つ．また、食品の表面と電極接触部が異なる組成を持つ食品も存在する．そして食品においては、調理において最適な温度が存在する．そのため本研究で電気刺激と温度刺激を併用する場合は、適応できる食品が限られてしまう．

このように本研究の環境では、Nimesha らの研究で活用されたような温度刺激を併用した味質制御は行いにくい．しかし、彼らの研究が目的としているのが仮想的な味再現であることに對し、本研究で目的とするのは食品への付加である．そのため、本研究で検証すべき項目は、食品が持つ味刺激と間での相乗効果である．これもまた全ての食品に對しての効果を網羅することは本研究の範疇を逸脱するが、起こりうる味質の変化を考えるための指標を導出することには意義がある．本節では、試作装置を用いて装置が持つ付加能力を検証する．ここでは検証対象として、味覚反応時間の比較と制御性、極性変化と制御性を取り上げる．

#### 3.3.1 検証1：味覚反応時間の比較

まず付加対象となる食品の味に對する味覚反応時間と、本装置を用いた際に付加される電気味覚の味覚反応時間を比較する．味覚反応時間に著しい差がなければ、電気味覚による付加と食品の味の知覚との混合の効果も得やすくなる．逆にもし著しい差が生じた場合には、食品の味の知覚との混合の効果が得にくい可能性が生じる．そのため、活用手法の構築にも影





### 3. 電氣的刺激付加装置の試作と検証

響があり，食品の味質の知覚と同等のタイミングで出力するためには，食器の形状を取らず，口内などに出力部を用意し，飲食行為を行うための動作を他の検出機構を用いて認識し，口に食品が含まれる少し前に電氣的刺激を提示するといった構造を別に設ける必要がある．

第2章で述べたように味刺激の提示から知覚までの味覚反応時間はこれまでの研究で明らかになっており，刺激濃度および強度と面積，味質によって多少の差異はあるがおおよそ1sec以内に収まる．また電気味覚の味覚反応時間も同様であることが示されている．しかし，本研究が対象とする飲食行為で摂取する食品や，飲食行為そのものが，理学的調査やその調査のように実験者が指定した限定的な環境で行われるとは限らない．よって本研究では，飲料型両極型装置を用い飲食行為を行った際の味覚反応時間を計測する．

#### 3.3.2 検証1：手法

実験では飲料型両極型装置を用い，直流刺激の付加を行った．刺激強度は電極間で1.0-1.2V，500  $\mu$ Aである．被験者は9名（男性7名，女性2名，実験に対する説明を行ったうえで同意を得られた被験者）で，試料としてポカリスエット（大塚製薬）を用いた．実験開始前には被験者に変化後の状態を学習させた．また，味の変化を感知するためには飲んでいる間に刺激の出力を行う必要があるため，飲料を飲んでいることを実験者が確認したうえで刺激の出力を行っている．

実験では被験者に事前に学習したのと同様の味の変化が生じたときに手元のスイッチを押すように教示した．試行回数は14回としているが，被験者の飲み方によって、まれに味の差を感じられないケースが存在した．具体的は3秒程度の間で反応が見られない場合は，装置からの出力が飲料に印加されていないなどの外部的原因が考えられる．そのため，3秒程度の間で被験者の応答がない場合，その試行を実回数に含めないものとした．





### 3. 電氣的刺激付加装置の試作と検証

比較する味覚反応時間は 2. 1. 1 で紹介した山本らの味覚反応時間[15]とした。山本らは酒石酸，食塩，ショ糖，塩酸キニーネを用い，各溶液の被験者 8～9 名，試行回数を 2 回とし単純応答時間を計測している。試行回数に差はあるものの被験者数が同等であることからこの結果を比較対象として用いることとした。

#### 3.3.3 検証 1：結果

図 3.6 は被験者毎に試行回数 14 回のうち応答時間の長いものと短いものをそれぞれ 2 回ずつ除いた 10 回の味覚反応時間平均を求めた結果である。本研究での味覚反応時間は最短で 197msec，最長で 1149msec であった。

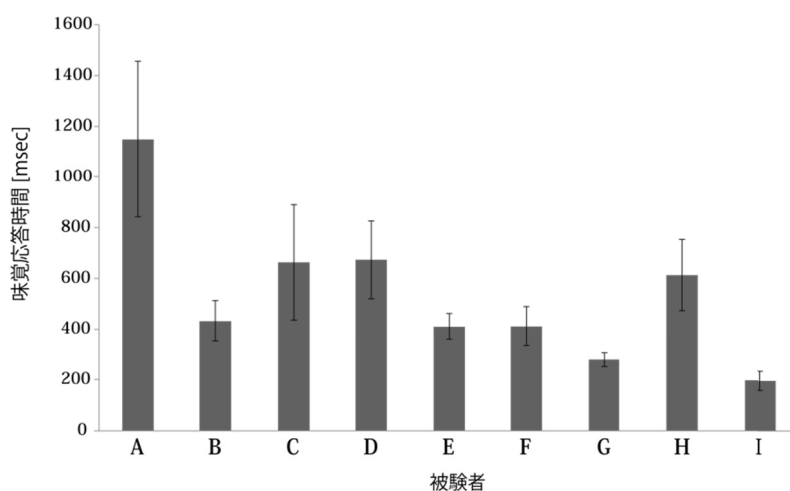


図 3.6 被験者毎の味覚反応時間平均（エラーバー:標準偏差）

また，上記と同じく被験者毎 10 回分の味覚反応時間を用いて算出した被験者間平均は 536msec であった。図 3.7 は参考としてこの被験者間平均と先行研究で得られている味覚反応時間の被験者間を比較したものである[15]。味覚反応時間の平均は電気味覚と比べ酒石酸 (0.5mol/L) とで 106msec, 食塩 (1mol/L) とで 103msec 速く, 逆にショ糖 (1mol/L) で 116msec, 塩酸キニーネ (0.013mol/L) で 224msec 遅い結果となっている。







### 3. 電氣的刺激付加装置の試作と検証

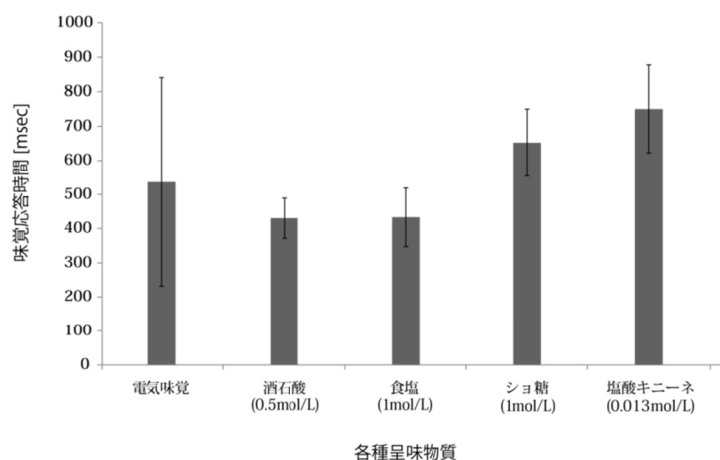


図 3.7 味覚反応時間の被験者間平均と各種呈味物質との比較

(エラーバー:標準偏差)

#### 3.3.4 検証 2：極性変化

先行研究では、陽極刺激、陰極刺激ではそれぞれ味質が異なることが示されている。それらの報告の中では、陽極刺激では金属味、酸味を強く感じ、陰極刺激では苦味に近い味を感じるという記述が多く見受けられる。また、閾値は陰極刺激に比べ陽極刺激のほうが低いことから、電気味覚計では主に陽極刺激が用いられている。本研究では、飲食行為に伴い食品に付加する味質として電気味覚を用いている。この場合、陽極刺激による味質と陰極刺激による味質が異なれば、付加できる味質の種類が増加し、それぞれの活用法を考案することができる。そのため、ここでは陽極刺激の付加と陰極刺激の付加で味質に差が生じるか検証する。

#### 3.3.5 検証 2：手法

両極型装置では舌面に提示する側の極性を変更できないため、本検証では飲料型一極型装置を用い、陽極刺激および陰極刺激の付加を行った。飲



### 3. 電氣的刺激付加装置の試作と検証

料は健康飲料（カゴメ株式会社，野菜生活 Refresh!瀬戸内レモン&ホワイトグレープ）を用いた．検証 1 では筆者が事前に行った多種の飲料で味質の変化が顕著に見られた清涼飲料水（ポカリスエット）を用いた．この飲料の場合，電解質が多く含まれることから電氣的刺激の出力による味質変化の効果が感じやすい傾向がある．それに対し，検証 2 では，電解質溶液とは異なる特性を持った飲料を対象とした．

被験者は 17 名（男性 12 名，女性 5 名，事前に実験に関する同意を得た被験者のみ），出力刺激は舌と口内提示側電極の間が陰極・陽極刺激ともに $\pm 0.3 \sim 0.5V$ ， $\pm 150 \mu A$  程度となるよう実験者が調節した．また皮膚表面電極はリストバンド型の電極を右前腕に固定させる形をとった（図 3.8）．実験は開目状態で行っているが，陽極刺激と陰極刺激の切り替えを遮蔽し，シングルブラインド実験として実施した（図 3.9）．



図 3.8 リストバンド型電極と装着時の状態

実験前には口内環境を整える目的で水を飲ませた．そして，事前に被験者に対し 4 回飲料を飲んだ後に飲料をグルーピングすることを伝えた後，陽極刺激，陰極刺激をそれぞれ 2 回ずつ，ランダムな順序で出力したものを飲ませた．このグルーピングにおいては，必ずしも 2 対 2 のグルーピングを行う必要がないこと，3 対 1 または 4 対 0 のようなグルーピングも存在することを教示している．被験者には全ての飲料を飲ませた後に，それ





### 3. 電氣的刺激付加装置の試作と検証

ら4回分の飲料をグルーピングさせ、口頭で回答させた。その後、非通電状態の飲料を飲ませ、先にグルーピングした飲料との比較を行わせた。また、グループごとの味の特徴について、自由回答でのヒアリングを行った。

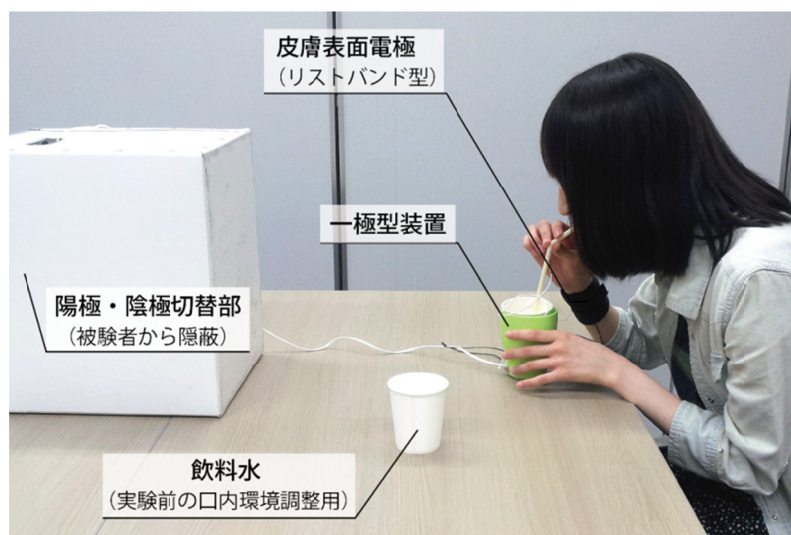


図 3.9 実験環境

#### 3.3.6 検証 2：結果

17 名中 16 名が陰極刺激と陽極刺激を正しい組み合わせでグルーピングできた。そのうち通電状態と非通電状態の差異は、9 名が明確に区別できた。7 名がグルーピングしたもののうち陰極刺激に当たるグループのものと類似していると回答した（表 3.1）。

表 3.1 被験者毎のグルーピング結果

グルーピング	通電・非通電間の味質の差異	人数
正解	区別できる	9 名
	陰極刺激に近いと感じる	7 名
不正解	同じ	1 名





### 3. 電氣的刺激付加装置の試作と検証

被験者への自由回答の結果は表 3.2 の通りである。陽極刺激は「金属味を感じる」、「ピリピリとした刺激を感じる」といった電気味覚特有の味に関連する表現や、「ツンとした味である」、「トマトのような酸味を感じる」との回答を得た。また陰極刺激では、「弱い金属味を感じる」、「苦みを感じる」、または「元の飲料の味をまろやかに感じる」と回答を得た。

表 3.2 陽極刺激及び陰極刺激に対する自由回答

陽極刺激	陰極刺激
<ul style="list-style-type: none"><li>・ ツンとした味</li><li>・ 金属味を強く感じる</li><li>・ ピリピリとした刺激がある</li><li>・ トマトのような酸っぱさ</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>・ 元の飲料の味質に近い</li><li>・ 苦味を感じる</li><li>・ 弱い金属味を感じる</li><li>・ まろやかに感じる</li></ul>

## 3.4 考察

### 3.4.1 検証 1：考察

検証 1 では試作装置使用時の出力から感知までの味覚反応時間を計測し、各種呈味物質での味覚反応時間との比較を行った。その結果、若干ばらつきはあるものの被験者 1 名を除き 1sec 以内に収まっている。被験者 A のみ応答まで 1sec 以上の時間を要しているが、その原因としては、本試作装置が実際に使用される状態と同じく、被験者自身がストローを用い飲む手法で計測しているからであると考えられる。理学的調査ではピペットで滴下した飲料に電氣的刺激を付加するといった方法もとられている。しかし、この調査は理学的知見を導出するには適切だが、本試作装置が





### 3. 電氣的刺激付加装置の試作と検証

実際に使用されるときには調査のような環境とはならない。飲料をストローで飲む場合には被験者の吸引速度やその際の飲料の流速によって、接触状態が変化する。また、面積を一定に制御する面でも統制がとりにくい環境となる。しかし、本実験で検証することは本研究で試作した装置を用いた場合の味覚反応時間であるため、使用法に沿った形での味覚反応時間として計測している。また、参考として各種呈味物質と比較を行ったが、比較対象である4溶液との差は100～200msec程度の差となった。濃度によって味覚反応時間は変化するため、濃度によってこの差は変化する。

#### 3.4.2 検証2：考察

検証2では、極性変化による味質の差異が食品への付加に対しても感じられるかを評価した。被験者17名中16名が極性による味質の変化を正しく分類できたことから、極性変化による味質の差異が食品を介した際にも感じられることが示された。本検証をダブルブラインドで実施し、被験者がランダムに回答した場合の正答率は2対2のグルーピングで約33%，1対3および4対0を可とした場合には12.5%となる。シングルブラインド実験として実施したため実験者によるバイアスが入ることを考慮に入れても、本検証での識別率は高いものであると考えられる。

また、陽極刺激、陰極刺激共に出力強度は同程度である。そのため実験後のヒアリングから得られた「陽極刺激より陰極刺激のほうが非通電状態と類似した味質に感じる」という意見は、先行研究における陽極刺激のほうが陰極刺激よりも味の差異を明確に感じるという知見に沿っている。

さらに、味質に対するヒアリングからも、陽極刺激では酸っぱい味や金属味を多くの被験者が感じ、陰極刺激では苦味に似た味が感じられたことから、先行研究の知見と同様の変化が感じられることが示唆された。加えて、陽極刺激でトマトのような味がしたという回答、陰極刺激で味がまろやかになったという回答があげられた。検証は1種の飲料のみで実施して





### 3. 電氣的刺激付加装置の試作と検証

いるが、筆者のこれまでの試行から、酸味を含むワインへ陰極刺激を付加した際にも酸味が弱まり、味がまろやかになったというコメントを得ている。これらのことから、陰極刺激の付加によって飲料が持つ味質が弱まり、それが酸味であった場合に「まろやかになった」と感じられると考えられる。このような効果は食品と刺激の組み合わせや刺激強度が影響するため、全ての食品で同様の効果が生じると限らないが、本検証においては、味質の付加だけでなく、食品が有するような味質を感じる、食品の味質が変化したように感じられる可能性が示唆された。この知見は、電極を直接舌に当てて行う電気味覚提示では起こりえないものとして新規な知見であると考えられる。電極を直接舌に当てる場合、混合して効果を与え合う他の味の介入がないからである。

## 3.5 おわりに

本章では、本研究の目的に基づいた装置の試作と、試作した装置の電気味覚付加能力の検証を行った。検証として、本装置を用いた味覚反応時間の計測と通常の呈味物質における味覚反応時間の比較と極性の変更が引き起こす味質の変化を対象として試作装置での検証を行った。この実験では、被験者ごとの味覚の個人差に合わせた出力調整は行っていない。これは理学的調査と比較すれば本研究は被験者間の統制がとれていない形になる。しかし飲食行為に用いる試作装置の使用法は、理学的調査における実験手順や環境と大きく異なる。そのため飲食行為で考えられる本装置の使用法に沿ったうえで、理学的調査の結果に依拠する部分があるか否かを調べた。

味覚反応時間においては、理学的調査から得られた各種呈味物質の味覚反応時間と比べても顕著な逸脱はないも装置の使用法において刺激面積が一定とならないため、被験者ごとのばらつきは大きくなった。基本的に食品の味と電気味覚の付加がもたらす味は同等の速度で受容されることが示唆された。もっとも、本実験での味覚反応時間の差で2つの味質を別々に





### 3. 電氣的刺激付加装置の試作と検証

弁別できるとしたら，検証2で行った極性による味質の差異に対する自由回答において，「途中で味が変化した」のような回答が得られるはずである．しかし，本実験の自由回答では上記のような回答は得られていない．本実験の溶液の濃度と電気味覚の強度では平均を見ると同等の速度で反応が認知されるため，限定的ではあるが，本検証での濃度と電気味覚強度が飲食した瞬間から電氣的刺激による味質の付加を提示するような活用手法を構築できる可能性が示唆された．今後，電気味覚の強度を変化させた場合の味覚反応時間を計測し，様々な濃度の溶液における反応時間と比較することで，試作装置使用時の味質の変化の時間差についてより詳細な対応関係を検証していくことができるだろう．

また味質の差異においては，基本的な特徴としては直接舌面に電氣的刺激を提示した先行研究から得られた知見に依拠している．しかし，仮説として述べたように，本研究では電氣的刺激と食品が持つ味覚刺激との相乗効果が発生し，特有の効果を引き起こす可能性が示された．

本検証で用いた飲料は，通常でも酸味をある程度有している．そのため，飲料の酸味に電気味覚で感じられる味質が付加され，トマトのような味として認識されたと考えられる．このように食品側に電気味覚が付加する味質と同じ傾向を持つ味質が含まれている場合，より増強されたように感じさせることができると考えられる．また，陰極刺激の提示によってまろやかに感じられたという知見は，減算効果と考えることも出来るだろう．この効果が全ての食品に適応できるか否かは本検証のみでは断定できない．しかし，飲食物に付加することによる味同士の相乗効果としてこのような効果が生じることは，この装置の付加能力によって得られた知見ということができる．

この2つの検証から，試作装置を用いて飲食した瞬間から電氣的刺激による味質の付加を提示するようなインタラクションを構築できること，極性の変化により味質の差異を引き起こせる他，食品の味との相乗効果を発





### 3. 電氣的刺激付加装置の試作と検証

生させられる可能性があることが示唆された．このことから，試作装置の使用により任意のタイミングで味質の付加を行うことができ，味質の付加によって食品の味を変化させられることが明らかとなった．







#### 4. 飲食行為における食品の機能の拡張

## 4. 飲食行為における 食品の機能の拡張

前章では飲食行為で摂取する食品に電氣的刺激による味質を付加する装置の提案と、試作の付加能力を検証した。検証の結果、試作装置は任意のタイミングで味質の付加を行うことができ、極性ごとの味質を付加できるほか、食品の味が変化したように感じさせられる可能性があることを知見として導出した。本章では、装置の活用法として、飲食行為と食品の機能の拡張による食品の機能や効果のバランス制御について議論する。ここでは食品が持つ栄養と味質のバランスが欠如する例として塩分の摂取過多を取り上げ、付加機構の応用による減塩支援手法を提案する。

### 4.1 本提案の対象

第1章で述べたように、食品の機能性として、第1次機能（栄養機能）、第2次機能（味覚・感覚機能または嗜好機能）、第3次機能（生体調節機能）があるとされている。このように機能は3分類に分かれているが、それらはお互い密接に関係している。第1次機能である栄養機能を満たす組成が何らかの味質やテクスチャを有し、第2次機能である味覚・感覚機能または嗜好機能に影響を及ぼす。第3次機能である生体調節機能を有する組成は味質やテクスチャを持つ場合と持たない場合はあるが、持つ場合には第1次機能（栄養機能）と同じく、第2次機能に影響を及ぼす。そして第2次機能（味覚・感覚機能または嗜好機能）は名称からも予想できるように、人の飲食行為における嗜好にもかかわってくる。





#### 4. 飲食行為における食品の機能の拡張

食品への電気味覚の付加は、第2次機能（味覚・感覚機能または嗜好機能）に影響を及ぼすものと考えられる。味覚修飾物質も同様に第2次機能（味覚・感覚機能または嗜好機能）に影響を及ぼす。しかし、味覚修飾物質の効果は数分から数十分で喪失するものの、さまざまな食品を摂取する中で一口一口に対する味質を制御するような用途においては制御性に欠ける。それに対し、電気味覚の付加による味質の変化は、付加と停止による変化を一口単位で制御することもでき、短時間での可逆的な制御に優れる。

ここで食品の味質に付加される電気味覚という観点から再考すると、電気味覚は食品の3機能を調節するものであると考えることもできる。電気味覚は第2次機能（味覚・感覚機能または嗜好機能）へ作用する刺激だが、それが食品に付加・重畳されることによって、他の機能へ効果を及ぼす可能性も考えられる。本研究では、飲食行為で摂取する食品の味質への電気味覚の付加による第2次機能（味覚・感覚機能または嗜好機能）の制御と他の機能への影響について検証する。具体的には、第1次機能（栄養機能）と第2次機能（味覚・感覚機能または嗜好機能）のバランスが欠如した状態に対し、第2次機能（味覚・感覚機能または嗜好機能）のみを制御することで、機能同士のバランスを調整することが可能かを議論する。

## 4.2 背景

### 4.2.1 塩分の摂取と健康

生きるためには飲食によって食品から必要な栄養分を摂取し続ける必要がある。しかし栄養分の摂取は、バランスによっては健康を害するリスクもはらんでいる。たとえば塩分は生命維持に深く関与しているものの、体内で生成することはできない。そのため食事による摂取が必要となる。しかし、過剰に摂取してしまうと、高血圧など様々な疾病を引き起こす原因にもなるものである。







#### 4. 飲食行為における食品の機能の拡張

特に日本人は塩分を過剰に摂取する傾向がある。WHO が定める推奨摂取量は 5～6g/日だが、成人の平均摂取量は男性 11.5g/日、女性 10.0g/日と推奨摂取量の 2 倍以上である[99]。アマゾンの一部では塩分摂取量が 1～2g/日の地域も存在し、その地域での高血圧患者はほぼ見受けられないとされているが[100]、日本では約 4 割が高血圧であると診断されている。

このような背景を受けて、日本国内でも塩分の過剰摂取に対する注意喚起がなされている。2010 年に厚生労働省が定めた食塩摂取目安量では、男性 9g 未満/日、女性 7.5g 未満/日と設定している[101]。これらの目安に伴い、塩分を減らした食事、いわゆる減塩食を積極的に推進する流れも見受けられる。飲食する側が自発的に摂取量を調節することは重要である。しかし、塩分は風味や食感に影響を与えているため、塩分を減らすと風味の減損も起こりうる。塩分を減らした食品は消費者の受容性を低下させるという報告もあることから[102]、単純に塩分量を低下させると物足りなさを感じる可能性が推測される。そのためたとえ調理者側が塩分量を抑えた食事を提供しても、飲食する側が食卓塩を追加することが懸念される。

精神的な満足感を得るための塩分は、嗜好品として作用しているともいえる。嗜好品の制限を自らの意思で継続することは難しいとされており[103]、気持ちの緩みなどから制限を断念する例も見受けられる。このように飲食する側の自発的な塩分摂取量の抑制だけで対処してしまうと、心的負担を発生させ、継続を妨げる可能性がある。食卓塩を追加する行為は、調理者や周りの飲食者からも見える行為である。そのためたとえば減塩食を作った調理者や、減塩中の飲食者とともに食事をする場合、その人達の心象に配慮をしてしまう可能性も考えられる。

##### 4.2.2 減塩手法と代替技術

減塩行為やそこで生じる制限への配慮は、これまでも様々な取り組みがなされ、それらは「減塩食」として定着しつつある。これら減塩食は、





#### 4. 飲食行為における食品の機能の拡張

たとえばナトリウム塩の一部をカリウム塩に置き換えた代替塩で塩味を補う手法や、焦げ目をつけて香りや食感を引き立たせる手法、酢やレモンなどの酸味で塩味を補う手法などが提案され、すでに食品業界だけでなく一般家庭でそのノウハウが活用されている。

これらの手法は、新たに塩分以外の調味料を追加することで塩分の欠如を緩和させるか、ナトリウムの代わりにカリウムを用いて塩分を提示しているものである。しかし、たとえばカリウム配合の代替塩においても、摂取過多による身体への影響を考慮する必要がある。通常、カリウムの過剰摂取分は体外に排出されるが、腎臓などに疾病を患っている場合、カリウム過多になり高カリウム症を引き起こす可能性があるからである。これらを踏まえ、全てをカリウム塩に置き換えることはできない。また、塩分以外の調味料の追加においても、塩分低下による塩味の代替を優先させることが前提ではあるものの、食材に合う調味の難しさが生じる。

また、塩味の代替物質も調査がなされている。リチウムイオンはナトリウムイオンと原子構造が類似しているため、塩味を引き起こすことはできるが、為害作用があるため用いることができないとされている。また、上記に上げたカリウム以外に、カルシウムイオン、マグネシウムイオンなども考慮されてきたが、塩味以外の味も生じるとされている。また、岡井らは塩味ペプチドを候補としてあげ、オルニチンタウリンというペプチドが比較的良好な塩味を呈すると述べている。また、味物質でなく、においの面から塩味を増強させる試みも存在する。下田らは醤油の既発成分中に塩味を強く連想させる匂い成分が存在し、匂いの存在下では食塩の味の強さが顕著に増強すると報告している。

山本らは、これら代替物質の探求は、基本的に全てをナトリウムイオンに置き換えるのではなく、食塩量を少なくし、これら代替物質を添加することで同じ強度の塩味を得ようというものであると述べている。しかし、





#### 4. 飲食行為における食品の機能の拡張

現時点では他の栄養素や化学的物質を追加することで塩味の欠如を補う点までにとどまっているのが現状である。

##### 4.2.3 陰極刺激の味覚制御効果

2009 年, Hettinger らは陰極刺激提示による塩味阻害現象を報告した [104]. 塩味を抑制する効果をもつ成分はこれまでにクロルヘキシジンが確認されているが, ビスビグアニドも塩味を阻害することが知られている. ビスビグアニドにおいてはイオンの流れを阻害することで塩味の阻害効果が発生する. そのため Hettinger らは電氣的刺激によるイオンの流れの変化と味受容に着目し, 従来から多用されていた陽極に加え, 陰極刺激でも味質調査を行うことで, 人の知覚上でも味質に対する阻害効果が発生するかを調査する実験を行っている. 陰極刺激の特徴については, 1985 年にも Hermess がラットを用いて調査しているが, Hettinger らはゴールデンハムスターを用いた電気生理学測定に加えて人での味質評価を行っている.

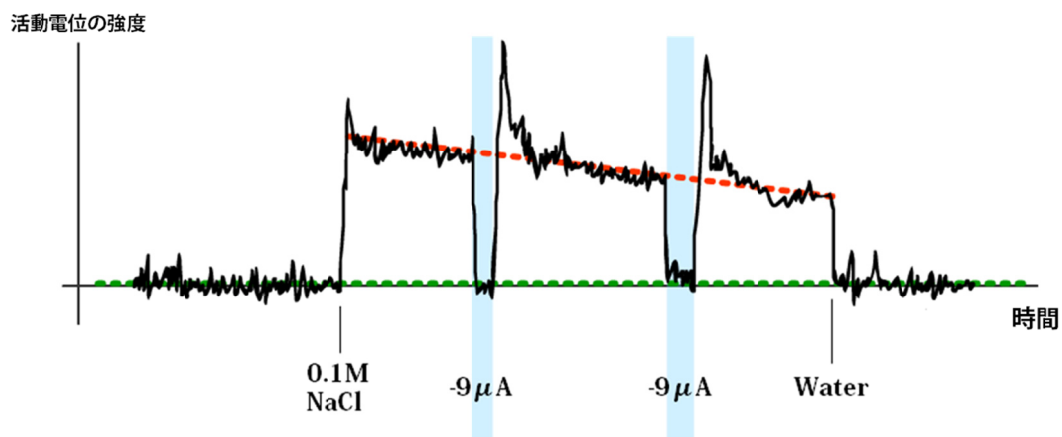


図 4.1 ゴールデンハムスターを用いた電気生理学計測

([104]内の図を一部修正)





#### 4. 飲食行為における食品の機能の拡張

神経細胞の電位変化を直接計測する電気生理学測定では，ゴールデンハムスターの下顎神経を切開し，舌面に塩化ナトリウム溶液とともに陽極刺激と陰極刺激を交互に 5sec ずつ提示し，活動電位の変化を計測している．その結果塩化ナトリウムによって誘起された活動電位において，陽極刺激を提示した際は活動電位が増加，陰極刺激が提示された際には活動電位が通常時と同等まで減少することが示された（図 4.1）．

細胞の活動電位の変化の測定に加え，Hettinger らは人を対象とした味質について調査を行ない知覚レベルでの効果を検証している．調査では複数の塩化物水溶液に対し $\pm 40 \mu A$ と $\pm 80 \mu A$ の電氣的刺激を 2sec 提示し，舌が液体に接した時（提示前），電氣的刺激が提示されている間（提示中）と，電氣的刺激の提示を停止した後（停止後）に味質を調査している．各状態の弁別および全体の強度，味質を調べた実験では，高濃度の溶液では提示中に全体の味質の強度が低下し，停止後にはまた低下した味質が再度感じられることを確認した．さらに低濃度の溶液では，提示前に比べ停止後のほうが全体の味質の強度がより強まることを確認している．

評価基準となる溶液で学習を行った後に全体の味質強度と塩分の強度を評価させたところ，全体の味質の強度，塩分強度だけでなく酸味や甘味，苦味が低下することも確認している．また，低濃度の溶液において，溶液のみの時系列味質強度においては時間が経過すると減少するのに対し，途中で陰極刺激の提示と停止を行った場合には同じ経過時間での塩分強度より強く感じられることが示されている．なお，この際に金属味も確認される事例があったことを述べている．

これらの実験結果から，理学的知見として示されているのが以下の事柄である．

- ・ 陰極刺激の提示によって塩味やその他の味が阻害される
- ・ 提示を止めた後には阻害された味質が再度知覚される





#### 4. 飲食行為における食品の機能の拡張

- ・塩の種類や濃度の影響は受けるものの、提示を止めた後の方が塩分強度を強く感じられる
- ・陽極刺激は提示中に常に刺激を与え、陰極刺激は味質を阻害する可能性がある

なおこの効果は塩の種類によって効果的に現れるものとそうでないものがあることが述べられている。

### 4.3 陰極刺激の付加と停止による 塩味味覚感度制御システム

食品の3大機能から塩分の摂取について議論すると、塩分は第1次機能（栄養機能）として適切な量の摂取が求められるが、副次的効果として第2次機能（味覚・感覚機能または嗜好機能）である味覚を誘起し、結果として塩味を嗜好する要因を発生させているといえる。そのため第1次機能（栄養機能）として適切な量以上の摂取を行ってしまっていると考えられる。すなわち、塩分の摂取においては、第1次機能（栄養機能）と第2次機能（味覚・感覚機能または嗜好機能）のバランスが良好に保たれていないということとなる。

本研究では、この第1次機能（栄養機能）と第2次機能のバランスの欠如に対し、電気味覚の付加効果を用いた第2次機能（味覚・感覚機能または嗜好機能）のみの制御を試みる。そして第2次機能（味覚・感覚機能または嗜好機能）を補完し、第1次機能（栄養機能）とのバランスを保つ一助として活用できるか検証する。先述の代替物質も同様の効果を持つものがあるが、代替物質への置き換えではなく知覚側を制御することで塩味を強める点に新規性があると考ええる。





#### 4. 飲食行為における食品の機能の拡張

具体的には、塩味の味覚感度を制御することで、食事中に物足りないと感じて新たに加えてしまうような塩分の抑制を支援するシステムを提案する。このシステムの構築にあたり筆者は2009年に Hettinger らによって発表された陰極刺激による塩味阻害現象に着目した[104]。彼らはハムスターを用いた電気生理学測定および人を対象とした味質評価を行い、塩化ナトリウムの提示で活性化した細胞の活動電位を陰極刺激で抑制できる点、そして停止後に陰極刺激提示前より塩味を強く感じる傾向がある点を明らかにした。

本研究では塩味を調節し、余分な塩分の摂取を抑えるためにこれら理学的知見を活用する。そのため陰極刺激提示中に塩味が阻害される効果ではなく、提示前・提示中と比較して停止後に塩味が強く感じられる効果に着目した。そして飲食直後に陰極刺激の付加と停止を行い、食材の塩味を本来より強く感じさせることによって、第2次機能（味覚・感覚機能または嗜好機能）の調節をおこなう。

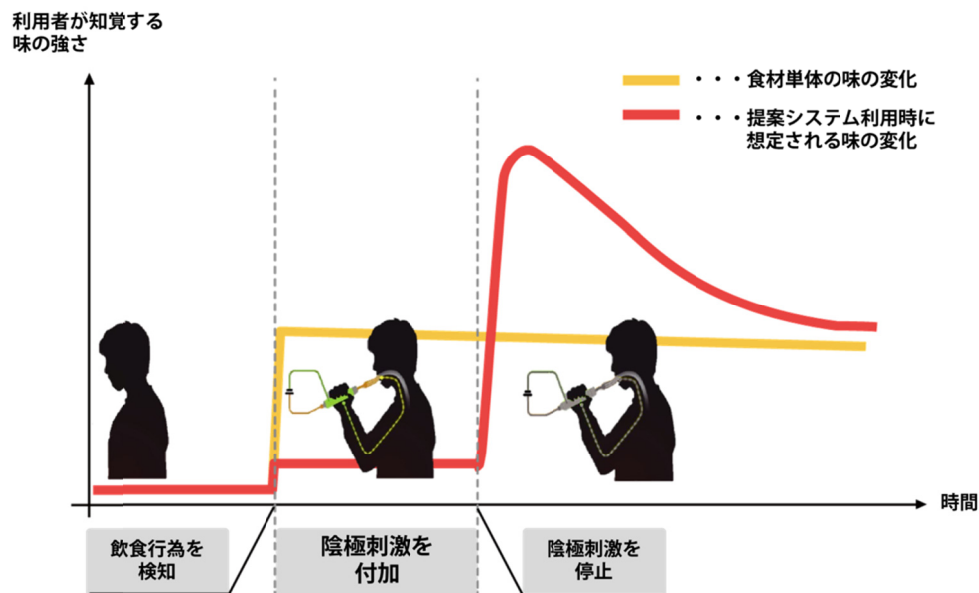


図 4.2 提案システム利用時に想定される塩味の変化







#### 4. 飲食行為における食品の機能の拡張

陰極刺激提示による塩味阻害現象について調査した先行研究では、理学的知見を得る目的で実験が設定され、提示前、提示中、停止後の味質が調査されていた。本論文では、利用者に食品の塩味を本来よりも濃く感じさせることが目的となる。そのため、図 4.2 のように飲食直後に陰極刺激を付加し塩味を一度減損させ、すぐに停止することで、その後の塩味の知覚を増強することが適切であると考えられる。そのため本論文では電気味覚付加装置を活用した飲食行為検知機構を作成し、検出された飲食行為を元に食品への陰極刺激の付加と停止を行うシステムを構築した（図 4.3）。

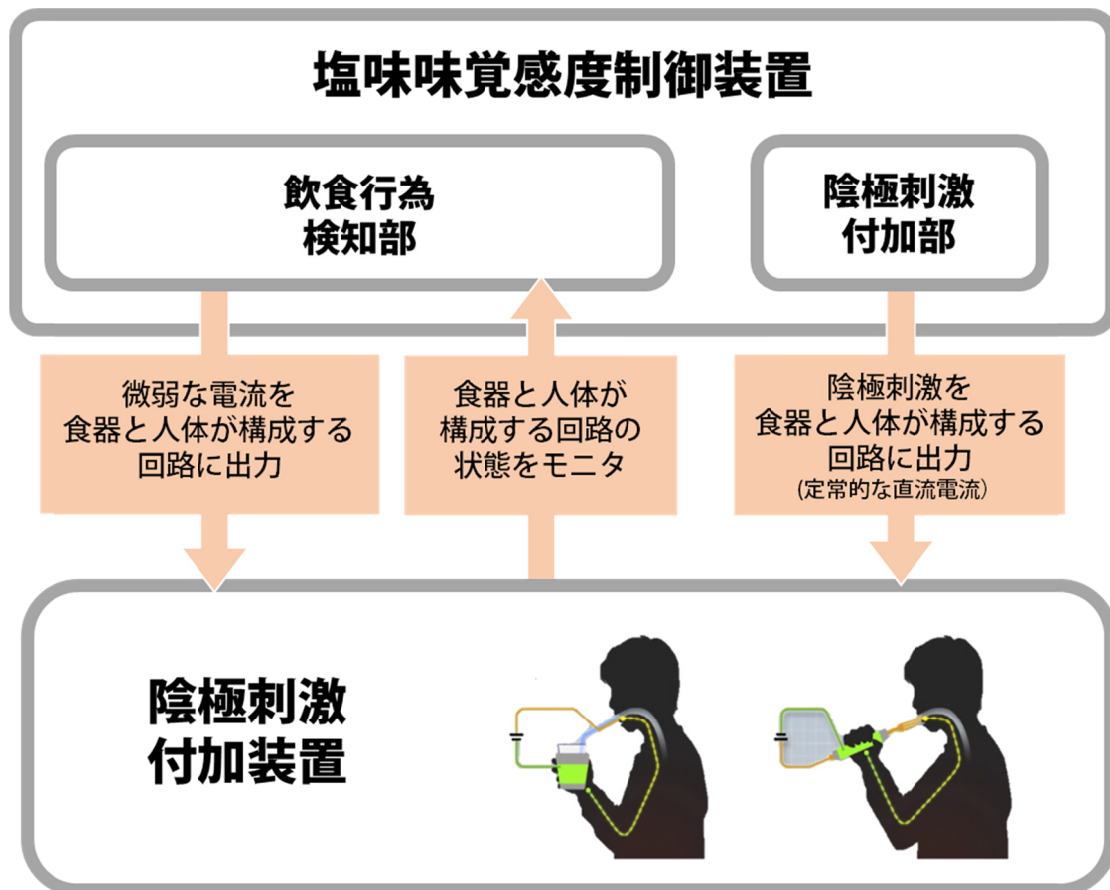


図 4.3 塩味味覚感度制御システム



## 4. 飲食行為における食品の機能の拡張

### 4.3.1 陰極刺激付加装置

第3章で述べたように、試作した装置は一極型装置、両極型装置の2種類がある。この装置の極数は、食品と接触する電極の数である。一極型装置は片方の極を食品と接触させ、もう片方の極を人体皮膚表面に配置し、電気味覚の付加を行う。これに対し両極型装置は両方の極を食品に接触させ、電気味覚の付加を行う。

これら装置の差異は、極性の差によって生じる味質のバリエーションである。両極型装置は食品に接触する極性を変更できないが、一極型装置は口内側電極の極性を変更でき、陽極と陰極の提示を切り替えられる。極性の切り替えによる味質の差異は、3.3で述べたとおり提案装置でも感知可能である。本提案においては、Hettingerらの実験から得られた知見を活用し塩味の制御を行うため、陰極刺激を飲食物に付加する。そのため、口内側電極に陰極を、人体皮膚表面側電極に陽極を割り当てる。

### 4.3.2 飲食行為検知部

飲食直後に自動的に陰極刺激の付加と停止を行うためには、利用者の飲食行為の検知が必要となる。筆者はこの飲食検知の手法として、回路内の電気的変化を用いて非飲食時と飲食時を区別する手法を提案している。

人体は導体であるため、電気回路内に人体を配置すると回路の一部とし、人の動きをスイッチとして活用することができる。一極型装置は提示電極が人体皮膚表面と食器とに分かれることから、飲食を行う際に回路が形成される構造となっている。そのため試作装置に一定の電圧を印加し飲食した際には、通常時と比べ飲食箇所以後の電圧が高くなる。この変化を活用したのが飲食行為検知部である。飲食行為検知部では、回路内の電圧上昇を検知するために、Arduinoを用いて構築した検知用回路を設けている。







## 4. 飲食行為における食品の機能の拡張

検知用回路では分圧回路から出力された電圧を Arduino のアナログ入力に接続しており、アナログ入力に与えられる電圧が閾値を上回った状態を飲食時として設定している。この閾値は事前に非接触時と接触時の電位差を計測しキャリブレーションを行う必要がある。

### 4.3.3 陰極刺激付加部

陰極刺激付加部では、先に述べた飲食行為検知部によって飲食行為が検知された直後に、陰極刺激の付加と停止を行う。提案装置では飲食行為が検知されない際には回路を切断している。飲食行為が検知された際に陰極刺激提示用回路を閉じ、飲食直後に陰極刺激を付加する。また、付加が開始されてから 1~2sec 経過した時点で陰極刺激付加用回路を切断し、陰極刺激の付加を停止する。提示時間は利用者が任意に設定できるが、飲食にかかる時間と刺激の効果を考慮すると、~2sec とするのが妥当である。

この際、飲食行為検知部が稼動したままでは、陰極刺激付加装置から出力された電圧も検知し、閾値として設定した値を上回り続けるため、誤作動を起こす可能性がある。そのため飲食行為が検知され、陰極刺激提示装置が動作している間は、飲食行為検知部を停止するよう設定した。

これらシステムによって、飲食が行われた直後に短時間で陰極刺激の付加と停止を行うことが可能となり、その直後の塩味味覚感度を制御できる。また、もしシステムが陰極刺激を停止する前に利用者が装置から口を離し、回路が切断されても、結果として陰極刺激の付加が停止されるため、同様の効果を得ることとなる。ただし、飲料などの場合は、システムが停止をするタイミングより後に飲み終える場合もあるので、本システムによる制御は必要となる。





#### 4. 飲食行為における食品の機能の拡張

## 4.4 塩味味覚感度制御システムの検証

### 4.4.1 検証 1：味覚感度の制御性

本章では 4.3 で説明した塩味味覚感度制御システムの効果の検証について説明する。先行研究では複数の塩化物溶液で検証が行われていたが、提案システムはより複雑な組成を持つ飲食物を対象としている。そのため、まず飲食物を摂取したときに、付加中と停止後の味質の違い、元の試料と停止後の試料の味質に差異が見受けられるかを調査した。また、キャリブレーションによる検知用回路の動作確認もかねた。

### 4.4.2 検証 1：手法

本実験では食料を対象とし、試料として魚肉ソーセージ（ニッスイおさかなのソーセージ、食塩相当量 75g あたり 1.4g、直径 20mm）を 8mm 幅で切りそろえたもの（約 0.47mol/L）を用いた。被験者は 16 名（男性 15 名、女性 1 名、事前に実験に対する同意を得られた被験者のみ）で、実験開始前のみ口内環境を整える目的で水を飲ませている。

本システムは実験前に検知用回路のキャリブレーションを必要とする。これは実際に装置を用いて飲食物を舌面に接触させ、接触時と非接触時の電位差を計測し、飲食行為がなされていると判断するための閾値を設定するものである。実験では、キャリブレーション時に実験と同様の効果を体験しないように、キャリブレーション時には飲食行為検知装置のみ稼働させている。キャリブレーションでは、試料を挿入したフォークを渡し、実験者の指示にあわせて食材を 6sec 程度舌の上に接触させる、離す操作を行わせて完全に検知できる値を設定した。手順は実験と同じとし、被験者に使用法を教示した。また、停止するタイミングの音刺激の提示は実験時と





#### 4. 飲食行為における食品の機能の拡張

同様 3sec 後に出力されている．キャリブレーションのための操作回数は 3 回を目安としたが，3 回で設定できない場合は以後の実験に支障をきたすため適宜追加した．キャリブレーションの 1 回目では実験の流れの把握として舌に接触させる，離す作業を，2 回目と 3 回目で舌に乗せたときと実験者が用意した音刺激がなった後とで味質の違いがあるかを口頭で質問し，刺激を付加しないときに味質の差がないかを確認した．

実験ではキャリブレーションと同様，試料を挿入したフォークを渡し，実験者の指示にあわせて食材を舌の上に接触させる，離す操作を行わせた．食材を舌の上に接触させる時間はこちらも 6 sec 程度とした．陰極刺激は舌との接触後 3 sec 程度付加され，直後に付加が停止するよう設定した．その後 3 sec 程度舌上に留めた後，被験者は飲食物を口から放す．この作業を 1 回とし，被験者には 3 回の試行を行わせた．各試行の終了後に，被験者には口頭で「味の違いを感じたか」を質問し，味の違いを感じた被験者には「前後どちらが全体の味を濃く感じたか」「前後どちらが塩味を濃く感じたか」について質問した．実験者は被験者の回答を試行ごとに記録した．また，被験者には味質の違いについて，自由回答も可能とした．このとき，被験者には音刺激の提示前後で味質が変わらない可能性があることも教示している．本検証での刺激付加時間は 3sec 程度としているが，これは被験者が試行の終了後に味質などについて回答することを配慮したためである．そのため，実使用の際には刺激付加時間を～2sec 程度に設定することができる．

最後に，陰極刺激を付加しない試料を実験で用いたものと同じフォークで舌の上に接触させるように指示し，6 sec 後に舌から離すよう指示した．その後，実験で味の違いを感じた被験者には元の試料から感じられる味の濃さと停止後に感じられる味質の濃さを比較させた．

本実験のキャリブレーション時に食材に提示される電圧は最大 0.15V 程度，電流は 40  $\mu$ A 程度であり，直接電氣的刺激を舌面に与えた際に感じ





#### 4. 飲食行為における食品の機能の拡張

られる弁別閾値よりは高い値となっている。この電氣的刺激で食品の味が変化したと感じる被験者は1名のみだが、実際には検知用出力は飲食が開始すると同時に切断されるため、実使用に影響はないと考えられる。また、実験時に食材に提示される電圧は一定の出力とし、 $-0.5V$  程度、電流は $-250\mu A$  程度に設定した。

##### 4.4.3 検証1：結果

実験の結果、48 試行（16 名×3 試行）中 44 試行で陰極刺激提示中と停止した後に味質の差を感じるとの回答を得た（表 4.1）。被験者別では 16 名中 12 名が 3 回の試行全てで味質の差異を感じ、残り 4 名は 3 回の試行のうち 2 回味質の差異を感じている。また、差異を感じたと回答があった 44 試行全てにおいて、陰極刺激の付加を停止した後のほうが味を濃く感じていた。塩分の濃さに対する比較では、44 試行中 40 試行で陰極刺激を停止した後のほうが濃く感じるとの回答を得た。

表 4.1 試行回数に対する味覚感度制御成功回数

味質の差異を感じた回数	44 回
停止後の味質を強く感じた回数（全体）	44 回
停止後の味質を強く感じた回数（塩味）	40 回
味質の差異を感じなかった回数	4 回

さらに陰極刺激を停止した後の試料の味質と元の試料の味質との比較（表 4.2）では、16 名中 11 名が「付加停止後の試料の方が濃く感じる」、2 名が「元の試料の味のほうが濃く感じる」、3 名が「付加停止後の試料と元の試料の味の濃さは同程度である」と回答した。





#### 4. 飲食行為における食品の機能の拡張

表 4.2 被験者毎の元の食材と停止後の味の濃さの比較

元試料の味の濃さ<停止後の味の濃さ	11 名
元試料の味の濃さ=停止後の味の濃さ	3 名
元試料の味の濃さ>停止後の味の濃さ	2 名

##### 4.4.4 検証 2：味質の変化

事前実験では、被験者による自由回答も参考資料として取得した。自由回答の中には、塩味の変化に対する回答が最も多く見受けられたが、酸味などその他の味が変化したという回答も見受けられた。また食材そのものの味の濃さの変化として感じられるという回答も見られ、中には陰極刺激提示中は食材の風味が減ったかのように感じたという回答もあった。

先行研究を鑑みれば、付加中にも陰極刺激による何らかの味質が付加されることも考えられる。本提案で用いる食材はより複雑な栄養素で構成されており、陰極刺激がそれらの味質にも変化を及ぼす可能性は塩化物溶液より高まると考えられる。そのため、塩味味覚感度制御システムによって起こる味質の変化において、基本味（甘味、苦味、塩味、酸味、旨味の 5 つ）に加えて金属味について、味質評価を行った。

##### 4.4.5 検証 2：手法

本実験では事前実験と同じく試料として魚肉ソーセージ（ニッスイおさかなのソーセージ、食塩相当量 75g あたり 1.4g、直径 20mm）を 8mm 幅で切りそろえたもの（約 0.47mol/L）を用いた。被験者は 10 名（男性 9 名、女性 1 名）で、実験で飲食物を介して電氣的刺激を人体に提示することを





#### 4. 飲食行為における食品の機能の拡張

伝え、同意を得られた被験者に対して実験を行った。また、実験開始前および各呈味調査前に口内環境を整える目的で水を飲ませている。陰極刺激付加部から食材に付加される実験刺激は検証 1 と同様に  $-0.5V$ ,  $-250\mu A$  とした。

本システムは被験者の飲食行為を検知し付加と停止を行う検知用回路を有しているが、被験者がすべて回答するまで刺激を付加し続ける必要があるため、本実験では付加用回路のみ使用し、実験者が提示と停止を切り替えられるものとした。被験者には陰極刺激付加前（通常の試料）、陰極刺激付加中、陰極刺激停止後、の 3 種の味質について評価させた。評価する味質は基本味（塩味、酸味、苦味、甘味、旨味の 5 つ）と金属味とし、先行研究[105]を参考に、0～10 までの均等目盛り（0…全く感じない、10…強く感じる）で回答させた（図 4.4）。

陰極刺激提示前として、何も付加しない状態の試料を一極型装置のフォーク先端に刺し、舌に当てた状態で味質ごとに答えさせた。次にそのまま陰極刺激を付加し、同じく味質ごとに答えさせた。最後に陰極刺激を停止し、直後の味質について味質ごとに回答させた。味質ごとの回答順はランダムとし、回答させる味質を変更する段階で魚肉ソーセージを交換するとともに、水を飲ませ口内の環境を整えさせた。

被験者は飲食物を舌に当てた状態で回答するため、被験者の前に評価尺度を印刷した用紙を置き、それらを指で指して指示させた。実験者は被験者の回答にあわせ、指示を評価用紙に記入し、記入内容を確認した上で次の実験に進むものとした。被験者 10 名から得られたデータは味質ごとに一元配置分散分析（対応あり）を行った。分散分析で有意差が発生したものにおいては、多重比較で付加前、付加中・停止後に対し、Bonferroni 法で有意差を算出した。







#### 4. 飲食行為における食品の機能の拡張



図 4.4 実験環境

##### 4.4.6 検証 2：結果

各味質の付加前，付加中，停止後の味覚強度の平均および標準偏差，有意差は以下の図 4.5 のとおりである．塩味，酸味，金属味においては，3 群間の差が認められた ( $F(2, 18) = 6.01, p < 0.01$ )．また，旨味においても上記 3 味ほどではないものの差が認められている ( $F(2, 18) = 3.55, p < 0.05$ )．苦味においては有意傾向が見られたが ( $F(2, 18) = 2.62, p < 0.1$ )，甘味においては差が認められなかった．

有意差があった 3 群間において行った反復測定（対応あり）の結果，金属味では付加前と停止後，付加中と停止後において停止後のほうがより濃いと認められた（有意水準 1%）．塩味，酸味においては付加中と停止後が金属味と同等，付加前と停止後が有意水準 5% で，停止後のほうがより濃いと認められた．







#### 4. 飲食行為における食品の機能の拡張

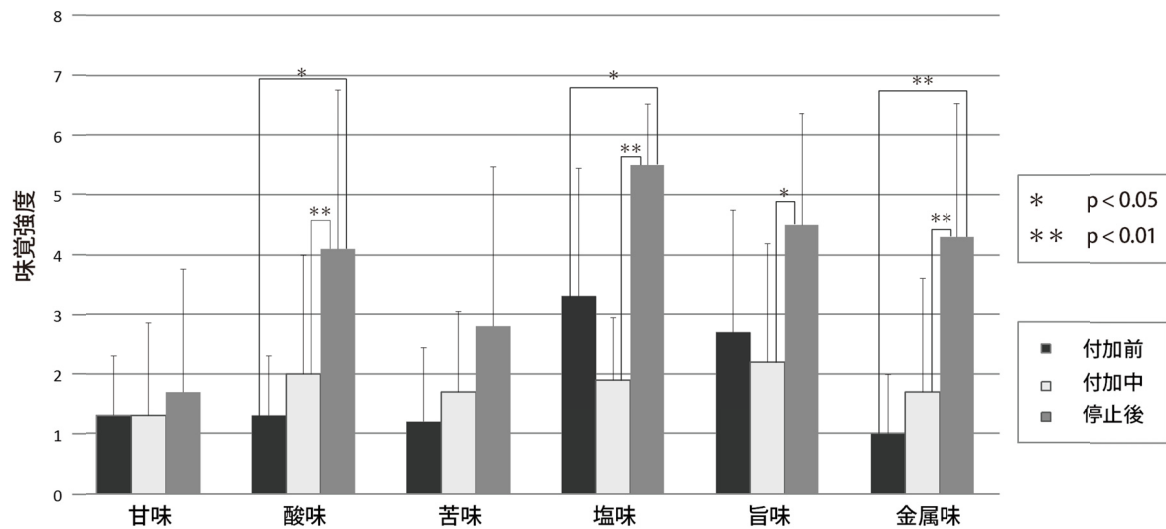


図 4.5 味質毎の付加前・付加中・停止後の味覚強度  
(エラーバー：標準偏差)

## 4.5 考察

### 4.5.1 検証 1：考察

本章では陰極刺激の付加と停止を用いた塩味味覚感度制御システムを提案した. 本システムは Hettinger らの理学的知見を工学的に応用している. 検証 1 の結果より, 味質の差異を感じた試行回数は全体の試行回数の 91.7% を占め, ほぼ全ての試行で味質の差異を感じる事が示された. また, 味質の差異を感じた試行に対して行った味の濃さにおける質問では, 全て付加中より停止後のほうが味を濃く感じられると回答がなされた. 塩味の濃さにおいても, 全体の試行回数の 83.3% で付加中より停止後の方が濃く感じられると回答がなされている. さらに被験者毎に見ると全被験者が 3 試行中 2 試行以上でこれらの差異を感じているので, 提案システムを用いた際に全く味質や濃さの違いを感じない被験者はいないこととなる. このことから, 塩味味覚感度制御システムが食品を対象とした味覚感度の制御を行える可能性が示唆された.





#### 4. 飲食行為における食品の機能の拡張

また、16 名中 11 名が、付加停止後の味のほうが元の試料の味と比較しても濃いと回答した。このことから、塩味味覚感度の制御によって、元の食材の塩味を本来より強く感じさせられる可能性も示されたと考えられる。ただし、16 名中 3 名は元の試料の味のほうが濃いと回答している。この原因については、味覚の個人差も関係すると考えられる。

##### 4.5.2 検証 2：考察

検証 1 で行った被験者への自由回答ヒアリングによって、塩味以外の味質の変化が生じている可能性が得られた。そのため、味質変化の検証として、基本味と金属味における付加前、付加中、停止後の味質を評価した。

実験結果から、塩味、酸味、金属味、旨味において陰極刺激の提示と停止による味質の差が有意に発生することが示された。さらに、金属味は特に付加前および付加中に対して停止後が有意に味を濃く感じられる結果となった。また、塩味、酸味においても付加前および付加中に対して停止後が有意に味を濃く感じられることが明らかとなった。

また全ての味質において、停止後は味を濃く感じられる傾向があることが示唆されている。このことから、提案装置を用いた陰極刺激の提示と停止による塩味味覚感度制御において、塩味が付加前および付加中に対して停止後に濃く感じられるほか、金属味、酸味は付加前および付加中に対して停止後に味を濃く感じられることが示唆された。この結果は先行研究の知見として述べられている塩味以外の味覚への影響ともある程度一致しており、妥当性があるものと考えられる。

基本 5 味と金属味における付加前、付加中、停止後の味質調査から、塩味が付加前や付加中に比べ停止後のほうが有意に濃く感じられることが明らかとなった。このことから、提案装置の使用により、塩味の味覚感度が制御され、元の食材より塩味を濃く感じさせる効果をもたらすことが示唆





#### 4. 飲食行為における食品の機能の拡張

された。本システムは利用時に一定時間塩味が阻害される。検証においては阻害時間を 3sec としているが、Hettinger らの人を用いた知覚実験や、筆者による試行から、阻害時間は 1~2sec 程度まで短くすることができる。そのため実際に使用する際には、塩味が阻害される時間を少なくすることが出来る。ただし本システムは、塩味が減損する瞬間が発生しても、最終的に塩味を濃く感じる事ができれば、減塩された食品を食べ続けるよりも満足度が高いという思想の元構築されている。たとえば、塩分が均一に分散している食品（例：スープ）に比べ、食品の周りに塩が振りかけられているような食品（例：ポテトチップス）のほうが、われわれが主観的に感じる塩味は濃く感じられる。また、他の感覚では刺激の提示順序によって主観的に記憶される刺激強度が変化することが示されており、最後に提示された刺激の影響を強く受けるとされている。これらが味覚の面で検証されているかは定かではないが、減塩の手法としても、献立の一部を塩分の濃いものにし、薄いものと交互に食べることで相対的な満足度をあげる試みがなされている。本システムではこの濃度差が非常に高速に繰り返される。食品のうち固体であれば食器との接触時間が限られるため阻害と増強の回数はさほど多くないが、液体は固体に比べ接触時間が長くなり、阻害と増強の回数が多くなると考えられる。このときの味の変化は、これまで人が体験をしたことがないものとなることも考えられる。この点については、阻害と増強の繰り返しを行う実験を行うことで検証できると考えられる。

また、塩味だけでなく、金属味、酸味においても、付加前・付加中に比べ停止後のほうが味質を濃く感じられる結果となった。これら効果はデモンストレーションから得られたフィードバックと一致する上、先行研究で言及されている塩味以外の味質への効果とも整合性が取れている。とはいえ、先行研究では複合的な組成を持つ食料において効果が得られる点については言及されていないため、本検証は、先行研究で解明された現象の日常的利用における指標を示すものとなったと考えられる。また筆者は、提





#### 4. 飲食行為における食品の機能の拡張

案装置によって塩味のみが増強されることを期待したが、塩味に加え複数の味に影響を与えることが示された。この点は本論文の副次的効果であるといえる。しかし、これら副次的効果の発生が現時点では免れないものの、論文で目的としている塩分の抑制に対しては、塩味の増強ができていることから一定の効果があるといえる。

本論文で用いた試料は、塩味を含むものに対する効果の検証として魚肉ソーセージを用いている。この試料における効果は、先に記述したように塩味・酸味、および金属味が増強されることが確認されている。しかし、ほかの塩味を含む食材、または塩味の比重の少ない食材を実験試料としては用いていない。

他の塩味を含む食材に用いたときの効果や塩味の比重の少ない食材に対する効果について考察すると、筆者はこれまでの試行およびデモンストレーションで、乳製品、鳥の燻製など、塩味を含む他の食材での実証を重ねている。その結果、これら食材でも実験と同じく塩味の知覚強度の変化を感じることができている。また、これらの食材の場合でも、塩味単体ではなく、味全体の変化、塩味以外の味質の濃さの変化が生じることが報告されている。本検証では対象とした一つの食材で味質の変化について調査を行ったが、今後一つの食材に対して塩分が一定量含まれるものと、減塩されたものを用意し、減塩されたものに対して陰極刺激を付加したときの味質と塩分が一定量含まれるものの味質の評価を行い比較することで、定量的な指標を導出できると考えられる。

本研究で引用した Hettinger らの研究では、数種の塩化物溶液で実験を行っているが、塩化物溶液によって陰極刺激提示前、提示中、停止後の強度の変化が異なることが示されている。そのため、食材に含まれる塩分の種類によって、多少の効果の差異が起こる可能性は否めない。とはいえ、食品に対し、組成の変化や代替物質の利用をせずに味質のみを変化させる





#### 4. 飲食行為における食品の機能の拡張

ことで、このような塩味知覚感度の制御をできることは、今後の減塩支援に電気味覚が貢献できる可能性を示唆するものになったといえる。

### 4.6 おわりに

陰極刺激による塩味味覚感度制御は、食品の第1次機能（栄養機能）と第2次機能（味覚・感覚機能または嗜好機能）のバランスの欠如に着目し、第1次機能（栄養機能）に影響を与えることなく、第2次機能（味覚・感覚機能または嗜好機能）を制御することを目的とした応用手法を提案している。その応用手法として、陰極刺激の付加と停止に伴う塩味知覚感度の変化に着目し、飲食行為に合わせて自動的に付加と停止を行うシステムとして構築した。

本システムで用いている飲食検知手法は、これまでの電気味覚計の使用法からは考えにくい手法でもある。なぜなら電気味覚計は舌に電極を接触させ、電極の触感が電氣的刺激によるものではないことを確認させてから、電氣的刺激の出力を行うからである。対して試作装置は食品への電気味覚の付加を前提に作られており、付加前と付加中を明示的に比較することが必要とされていない。そのため、飲食行為による電氣的变化を飲食行為の検知として用いる手法が提案できるのである。

事前実験から、システムの使用で予期される効果が得られることを明らかにしたうえで、実験によって味質を評価した。その結果、若干の他の味への影響はあるものの、第1次機能（栄養機能）の塩分に影響を与えることなく第2次機能（味覚・感覚機能または嗜好機能）である塩味を制御し増強している。この神経伝達の一部を電氣的刺激でコントロールし、人間の知覚感度を制御するこの手法は、電気味覚の付加機能の日常の食事への活用において、食品が持つ3大機能のバランスを保つ用途で使用できる可能性があるといえる。





#### 4. 飲食行為における食品の機能の拡張

本システムの実使用および継続的な使用においては、塩分濃度と増強率、そして本システムによる塩味増強によって本当に減塩が行えるかについて考える必要がある。まず、塩分濃度が濃いものに対しても本システムによる増強効果があるかについてである。もし塩分濃度が濃いものに対しても増強効果がある場合、より濃い塩分を求め減塩を行わずに本システムを使用することも考えられるだろう。この点については、Hettinger らの知見によると、塩分濃度の異なる液体 2 種を比較した際に、塩分濃度の濃いものは停止後に元の塩味が復活するものの、低濃度のものほどの増強効果が起こらないことが示されている。また、塩味においては人が好ましいと感じる濃度があり、塩分濃度が濃いもので増強された場合はそれを好ましいと感じない可能性も考えられる。この点については今後臨床実験として、塩と装置双方を利用できる環境で被験者が双方をどのように利用するかを観察することが望まれるだろう。







## 5. 結論

# 5. 結論

本論文は、飲食行為中の情報出力、特に摂取される食品の機能を考慮した情報出力技術を対象とし、飲食行為によって食品の機能を拡張することを目的として手法の提案・構築及び検証を行った。

第1章では飲食行為によって摂取する食品の機能が人に与える効果について紹介した。そして第2次機能（味覚・感覚機能または嗜好機能）による嗜好が食品の摂取や選択に与える影響について議論した。そして、栄養価や成分を変化させず、味覚器への直接的な刺激で第2次機能（味覚・感覚機能または嗜好機能）を制御する手法として、電気味覚の活用を提案した。また、第2章では本研究に関連する先行研究を紹介した。ここでは特に味覚の構造、情報科学技術を活用した飲食行為や食品の加工に関する研究、そして電気味覚の特性と変遷やこれまでの活用用途を紹介している。

その上で、飲食行為にあわせて電氣的刺激を出力することで、食品が持つ味質へ電氣的刺激による味質を付加できることに着目した。そして電気味覚の化学物質による味質呈示などに比べ効果を制御しやすい点、味を含む刺激の出力であるにもかかわらず、栄養価を持たない点を活用することで、飲食行為に合わせて食品の機能を拡張でき、さらに第1次機能（栄養機能）に関する成分を変化させずに第2次機能（味覚・感覚機能または嗜好機能）を制御できると仮定した。そしてこの制御が可能であれば、食品の機能が発揮する効果のバランスが調整でき、食品の選択へのバイアスが解消され摂取の過剰・不足の軽減に貢献出来ると仮定した。

そのために、飲食行為中に食品の摂取に合わせて電氣的刺激による味質の変化を付加する装置を試作し、検証を行うとともに、飲食行為における







## 5. 結論

食品の機能の拡張例として、塩の摂取において塩分の変化なしに塩味を制御する手法を提案，検証した．

### 5.1 電氣的刺激の付加手法において

第3章では，電氣的刺激による味質の変化を食品の摂取にあわせて制御する時に求められる要件について議論し，その要件を元に試作装置を実装した．ここでは，電気味覚が舌に電氣的刺激が出力されることで感じられる感覚であること，食品に付加することを目的とする装置の試作が目的であることから，口内に含んでいる食品に電氣的刺激を出力し，食品を介して舌へと電氣的刺激が伝わる構造が求められることを述べた．この要件に基づき，両極を食品と接触させる両極型と，片方の極を食品と接触させる一極型の装置の試作を行った．また，装置の形状として，これまで食品を把持する用途で使われてきた食器に着目し，食料用としてフォーク型を，飲料用としてカップ型を試作した．

そして，試作した装置が有する付加能力と制御性についての指標を得るために，試作装置を用いた検証を行った．本研究では，味覚反応時間と，極性による味質の差異を検証の対象として挙げ，実験を行った．味覚反応時間においては，被験者ごとにばらつきが生じたものの，理学的調査から得られた各種呈味物質の味覚反応時間と比べ同程度の反応時間となった．飲食直後から付加するような出力の際に途中で味質が変化したというフィードバックがないことから，基本的に食品の味と電気味覚の付加がもたらす味は同等の速度で受容されることが明らかになった．

また，電気味覚の味質は直接舌面に電氣的刺激を提示した先行研究から得られた知見から類推できるが，本研究の出力手法では食品の味質に付加されるため，電極を直接接触させる方式での実験や手法では起こりえない味の重畳や混合などが起こる可能性があるかと仮定し，特に極性による味質の差異についても検証を行った．





## 5. 結論

その結果, 基本的な味質は先行研究からえられた知見に準拠するものの, 同時に飲料への電気味覚による味質の付加を飲料の味の変化のように感じる状態があることが明らかとなった. 味の変化として, 食品が持つ味を強める増強効果と食品が持つ味をやわらげる減算効果が見受けられた. このことから, 試作装置の付加能力は, 任意のタイミングで味質の付加を行うことができ, その味質で食品の味を変化させられることが示された.

### 5.2 飲食行為と食品の機能の 拡張において

第4章では前章で作成した試作装置とその付加能力を活用した飲食行為における食品の機能の拡張について議論と提案を行った. まず電気味覚による味質の付加は食品の3大機能における第2次機能(味覚・感覚機能または嗜好機能)を制御することに着目した. その上で, 第1次機能(栄養機能)と第2次機能(味覚・感覚機能または嗜好機能)のバランスが欠如した状態に対し, 第2次機能(味覚・感覚機能または嗜好機能)を制御することでバランスを補助することを目的に, 塩分摂取における塩味の味覚感度を陰極刺激の付加と停止で制御する手法を提案し検証を行った.

手法の構築にあたり, 飲食行為の検知手法を提案し, 陰極刺激の付加と停止を自動的に行うシステムを実装した. 事前実験から, システム使用で予期される効果が得られることを明らかにしたうえで, 実験によってその味質を評価した. その結果, 若干の他の味への影響はあるものの, 第1次機能である栄養要素の塩分に影響を与えることなく第2次機能(味覚・感覚機能または嗜好機能)である塩味を制御し増強していることを示した.

これらの結果, 電氣的刺激の付加により, 栄養価や成分を変化させずに第2次機能(味覚・感覚機能または嗜好機能)を制御することができることを示した. そして, 電氣的刺激による味質の変化を食品の摂取に合わせ





## 5. 結論

て制御し食品の第2次機能（味覚・感覚機能または嗜好機能）を拡張することで、他の機能とのバランスを保ち、食品の選択にかかる嗜好からのバイアスの制御、ひいてはそれによって起こりうる摂取過剰・不足の軽減に貢献出来ることが示された。





## 6. 展望

# 6. 展望

本研究では、食品の飲食に伴い電氣的刺激を出力し、食品の第2次機能（味覚・感覚機能または嗜好機能）に情報の付加を行う装置の試作と検証、応用手法の提案をおこなった。ここでは、本研究で作成した試作装置の他の活用法をあげるとともに、長期的使用に向けた改善について議論する。

## 6.1 試作装置の他の使用例

筆者は電気味覚付加装置の他の応用事例として、近接のコミュニケーションや味覚情報の配信技術、そして付加情報による感覚の拡張について提案を行ってきた。

### 6.1.1 電気味覚配信

現在 YouTube や Podcast などネットワーク上に音楽や動画素材をアップロードし、不特定多数のユーザと共有する環境が豊富である。共有されたデータのうち、音響信号などの波形信号は出力時に電氣的变化に変換され、その電氣的变化がスピーカーで音刺激に変換される。そのため、この電氣的变化を電気味覚付加装置へ出力すれば、聴覚刺激を含む素材を電気味覚呈示データとして活用できる。そのため、ネットワーク上にある聴覚刺激を含む素材はすべて電気味覚呈示データとして活用できる。加えて呈示刺激を音響情報として共有すれば、不特定多数のユーザに電気味覚レシピともいえる味覚データを配信することも可能だと考えられる。

電気味覚配信は、主に音素材の製作とアップロード、そして個人が所有する増幅器での再生からなる。作成者は作成した音素材を動画・音楽配信





## 6. 展望

または共有サイトにアップロードし、一方でユーザは該当素材をダウンロードし再生する．再生時は配信での出力刺激の強度では電気味覚を引き起こすには不足しているため、増幅器を用いる．電気味覚専用の編集・配信機構の作成は難しくないが、呈示波形刺激は既存の音楽・波形編集ソフトで作成可能である．また配信においても現在主流となっている動画・音楽配信サイトを用いることで、これまで共有された波形刺激を活用できる．

既存の波形信号を含むデータおよび電気味覚配信で共有できる電気味覚呈示データは、電気味覚におけるレシピともいえる．レシピはこれまで文書と画像情報で調理手法によって記述されていたが、本提案ではレシピは味質の変化そのものを波形信号として記述している．よって個人の味の嗜好および味覚の差、増幅器の若干の能力差を除けば、味に対する情報を直接的に伝達できるといえる．

電気味覚レシピは既存のレシピと同じく配信されたレシピの改良も可能である．また配信者によって推薦された食材以外で試すことがユーザに委ねられる点は調味料に近いと考えられる．何より、ネットワーク上に存在するあまねく波形情報を活用でき、既存の楽曲を電気味覚レシピとして用いた際の感想の共有がすでにレシピの共有に準じた行為となる点が、新規だといえる．

### 6.1.2 複数人での飲食行為

食事を行う環境では、調理者と飲食者間の交流もさることながら複数の飲食者間のインタラクションも重要といえる．他者との食事は、会話をはじめとして一人での食事とは異なるインタラクションを持っている．特に、一緒に同じ物を食べる、相手に与える行為は、両者の親密さをより増加させるものといえる





## 6. 展望

電気味覚付加装置では、人体を回路に用いる手法についても提案してきた。そして回路に用いる人体が複数でも動作することも確認している。本節では複数人で手をつなぐ、食べさせるといった行為に伴い味質が変化する手法を提案できる。一例として両極を口内に呈示する飲料用インタフェースを2人で用いる場合、2人がそれぞれ1本のストローから飲料を飲み、その間に手をつなぐ、相手の皮膚に触れる動作を行うと両者の体も含んだ形で回路が構成される（図 6.1）。そして両者同時に電気味覚の付加された飲料を飲むことが可能である。

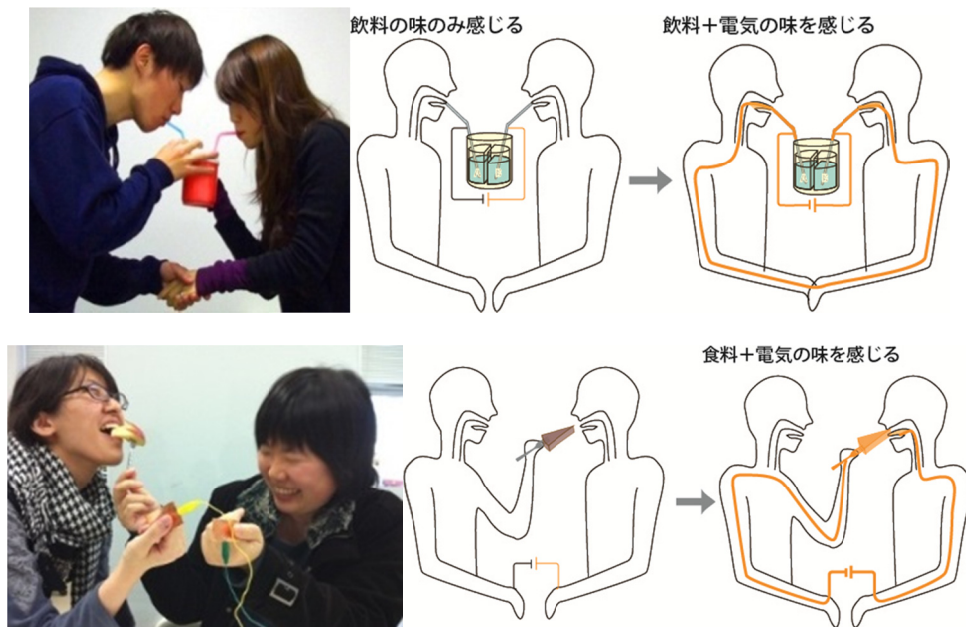


図 6.1 複数人使用法時の回路構成（上：飲料用 下：食料用）

### 6.1.3 味覚拡張

生物は各感覚受容器から得られる情報を元に、外界を理解し反応する。それらには機能的限界が存在し、適刺激や閾値がある。人は感覚受容器の閾値外にも物理的、化学的情報があることを理解しているほか、感覚受容器の機能の一部または全部を欠損した際に、不具合を覚えることもある。





## 6. 展望

このような状況に対し，これまで感覚受容器の閾値外にある情報を取得・補完するために様々な装置・手法が提案されてきた．これらは手法と目的に応じ大まかに3つに分けられると考えられる（図 6.2）．

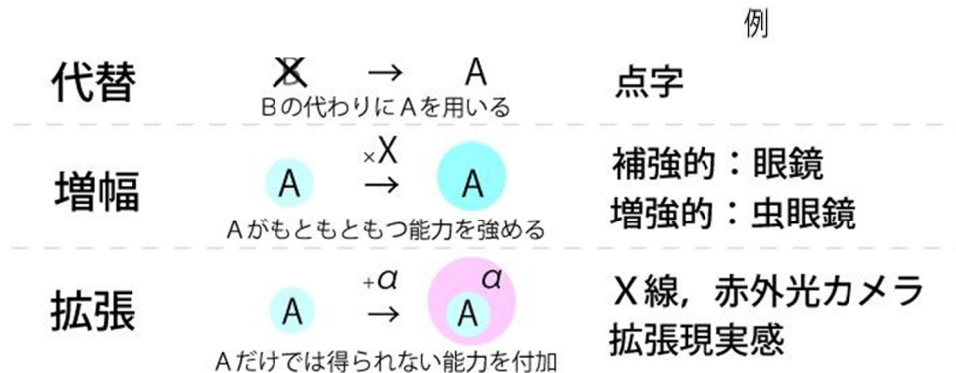


図 6.2 感覚の代替，増幅，拡張

1つ目は別の器官での代替であり，視覚情報を点の凹凸という触覚情報に代替して提示する点字が例としてあげられる．2つ目は元からある機能の増幅で，眼鏡のように機能を一定水準まで向上させる補強の意味を持つもの，虫眼鏡のように一定水準にある機能をさらに増強させるものに分類される．3つ目は本来感覚器が受容不可能なものを受容可能にする拡張である．本来不可視であるX線や赤外光を見るための特殊なカメラや，仮想世界の情報を実世界と関連付け空間情報を補う拡張現実感技術などがあげられる．電気味覚を用いることで，機能の増幅と拡張ができる例について説明する．味覚器が弁別できる味の差異には限界があり，微量に含まれた混入物やわずかな濃度の違いを弁別できない場合もある．しかし pH センサによる入力を電気味覚に置き換え提示すれば，通常弁別できない飲食物の味の違いを弁別することも可能となる．

また，味覚器で受容可能である物質の種類を拡張することもできる．たとえば大気中の二酸化炭素濃度を検出するセンサを口元に装着して，呼気と吸気に含まれる二酸化炭素濃度を検出する．その情報を電氣的刺激として味覚器に呈示すると，呼気と吸気の違いも味として感じるができる







## 6. 展望

と考えられる。また、音楽を味わうことも可能となる点では、他感覚器官が感知する情報を代替する用途でも用いることができる。

### 6.2 長期的使用に向けた改善

本研究で提案した装置は、電気味覚の飲食物への付加による味質変化と応用手法について検討を行うために試作したものである。本節では、試作の中で得た知見を元にさまざまな食環境での長期的利用で配慮すべき点について議論する。

#### 6.2.1 食器としての改善

本研究では、試作として食料用をフォーク型、飲料用をカップ型で実装した。この2つの食器は日常の食事では比較的用いられやすいものの、これだけで全ての食事に対応できるわけではない。

また、試作装置は検証や機能の確認への活用も重視した形状となっているが、今後より日常の食事に密接した装置として展開するためには、より食事環境に適したデザインの洗練が必要となる。試作段階では装置の改良と共に外観の改善を図ってきたが、試作の外観によって体験者が抱く心象に変化があることを非常に強く感じる結果となった。

食器としての改善は、まず食器の種類のバリエーションがあるだろう。たとえば食料用装置は、フォーク以外にもスプーン、箸などが考えられる。これらは形状からフォークでの試作とはまた異なった装置構成を行う必要も生じる。ここでは一例としての実装法を挙げる。

まずスプーン型の場合、電極となりうるつぼ（スプーンの先の各種飲食物をすくう部分）が全面的に口内と触れ合うこととなる。電極が飲食物を介さず直接接触する場合、飲食物分の抵抗が不足するため、舌や唇などに必要以上の出力が提示されうる。これは装置の本来の意図とは異なる上、





## 6. 展望

不快感を与える可能性がある。そのため、スプーンの金属部分をシリコンなど非導電素材で覆い、一部に穴を開けるような実装が考えられる。一部穴を開けた部分は電極が露出するが、周りのシリコンの厚みにより電極が直接口内に接触しない形となる。柄の部分においては、フォーク型装置と同様の仕組みを用いることができるだろう。

次に箸型の場合、一極型装置と両極型装置で構成が異なる。一極型装置の場合、把持部分を皮膚表面側の金属で覆い、先端はスプーン型と同じくシリコンなどの非導電素材で覆った上で一部に穴をあける形が考えられる。箸は食べ物を刺して口に運ぶ場合と、食べ物を挟んで口に運ぶ場合があるので、口に運ぶ場合を考えると箸先をすべて金属にすると口内に接触する可能性があるためである。両極型装置の場合、それぞれが電源部とつながる必要があるため、装置の食器としてのデザインは若干使いにくいものになることが予想される。

また飲み物におけるカップ型は、試作したものは中に飲料用の紙コップを装着する形となっている。紙コップの着脱によって衛生面は保たれるが、日常での長期的使用を考えた場合、一体となっているほうが好ましい。また、温度の高い飲料をストロー越しに飲むのは実際の食事では考えにくい他、火傷を伴う可能性が考えられる。

そのため装置の改良としては、回路部と飲料部の2層になったカップで、カップ内側が口に当たらない程度の部分まで金属で覆われているものが考えられる。門村らのティーテルミンではカップ底面中央にステンレス釘を打ち込み、それを電極としていた。しかしカップを持って飲料を飲む場合、傾斜によりカップ内側と飲料が接触する部分が変わる。そのためできるだけ多くの面を電極で覆う必要がある。さらに、電極が飲み口部分まで達していると、食料型と同じく舌や唇が接触し、不快感の原因となる（これが飲み口部分だけを金属にする対処では不十分な理由である）。





## 6. 展望

また、手掴みで食べる場合は、おそらく食器とは若干形態の異なるデザインが必要となる。たとえば首部にチョーカー型の皮膚接触用電極を取り付け、手首などにもう片方の電極を取り付ける形である。これは現在普及している電気味覚計とほぼ同様の装置構成になる。

食器としての改善として、次にあげられるのが衛生上の配慮である。食器は飲食物や唾液の付着と腐食によって衛生的とはいえない状態となる。筆者は試作のデモンストレーションではアルコールを含まないウェットティッシュなどでそれらをふき取る、などの対応を行ってきた。しかし本来であれば、口や飲食物に触れる部分だけ取り外し、他の食器と同じように洗えることが好ましい。そのためには、口や飲食物に触れる部分の着脱が可能で、さらに多少の水分が付着しても回路に支障をきたさないようなデザインが求められる。たとえば着脱部にネオジウム磁石を用いる手法が考えられる。ネオジウム磁石は周りがニッケルなどでコーティングされていることが多く、導電性を確保できる。この磁石で回路部と口や飲食物に触れる部分を接続すれば、洗う時には取り外すこともできるだろう。さらには飲食物と触れる部分を取り外せる構造に改良し、その部分のみを洗浄可能にするだけでなく、回路を含む本体も耐水性が求められる。実際に飲食を行う環境では食品として液体が存在し、それらが回路を含む本体と接触する可能性も排除できないからである。現時点でも飲料用の装置は液体を入れる容器と回路が付属する容器を別にするなどの配慮を行っているが、食料用の装置ではフォーク挿入部およびスライダ部からの液体の流入によって回路に損傷が起こる可能性がある。この点については、食器外装として利用可能な樹脂などで外装をコーティングしつつ、内部回路のメンテナンスを行えるような取り外し機構を持つ構造を構築することが求められる。





## 6. 展望

### 6.2.2 金属部の改善

装置の電極部となる食器は、試作段階では銀 (99.5%) のものを用いている。また、現在普及している電気味覚計は、使用金属のコストを鑑みた上で、ステンレスを採用している。しかし金やプラチナのほうが化学反応に強い特性を持っている。電気分解の観点からも、金やプラチナは析出の可能性のある媒体が王水だけであることから、さまざまな食品を飲食することを鑑みても適していると考えられる。

そのため、長期利用での食器素材として、ステンレスに金メッキを用いたものがより適した素材ではないかと考えられる。メッキ加工は経年劣化や傷などで表面がはがれる可能性もあるが、内部がステンレスであれば、基本的には電気味覚計と同等である。また、金メッキ製品は純金製や純銀製より安価で取り扱いも多いため、交換にあたっては負担が少ないことも利点である。

### 6.2.3 出力電源部の改善

試作段階の装置は、出力電源と直列で人体が配置されていた。この場合人体抵抗や食物の抵抗を大きく受ける形となる。食品の組成と導電率はさまざまであるため精度に一定のばらつきが出るのは回避できないが、抵抗においては、人体と食物の抵抗を大きく上回る抵抗を有した回路か、可変定電流回路を用いることである程度一定に保つことができる。

舌と皮膚表面を電極接触部とした場合の抵抗は  $20\text{k}\sim 100\text{k}\Omega$  であり、この値を元に電気味覚計は定電流回路の設定を行っている。本提案ではさらに飲食物の抵抗が加わるため、さらにこのばらつきは大きくなる。そのため舌と皮膚表面を電極接触部とし、人体及び食品を介して起こる抵抗を  $20\text{k}\sim 200\text{k}\Omega$  と設定した可変定電流回路を用いるのが好ましい。





## 6. 展望

### 6.3 各分野への貢献と展望

#### 6.3.1 食品・味覚分野

本研究は、食品・味覚分野においては食品添加物、特に味覚修飾物質に近い位置づけにあると考えられる。味覚修飾物質は栄養価の変化なく呈味を誘導したり阻害したりする効果があることから、本研究の電気味覚における味覚・感覚機能および嗜好機能の制御と非常に親和性が高い。これら添加物に対する電気味覚のアドバンテージは2つあげられる。

まず非常に短いタイムスパンでの可逆性のある制御が行えることである。通常添加物は一度添加するとそれを取り除くのは非常に難しくなる。それに対し、電気味覚は電氣的刺激の出力を制御することで、効果の付加と停止を行うことができる。

次に上げるのは、味への効果に対し、栄養価の変動を起こさないことである。味覚修飾物質も同様の性質を持っているものの、上記にあげた短いタイムスパンでの可逆性は現状では期待できない。ただし、電気味覚と味覚修飾物質を併用する手法は検討の余地がある。

今後の展望としては、第4章では制御の一例として塩味をあげたが、他の味においても同様の制御を行い、食品の摂取過多・不足の軽減をさらに軽減できるかを検討したい。本研究では対象としていないが、電気味覚の味質の食品への付加で塩味以外の制御を行える可能性は十分に存在する。たとえば、酸味は塩味と受容の構造が似ているため、陰極刺激を用いることで減損や増強を行える可能性がある。実際に筆者が酸味の強いワインに陰極刺激を付加するという試行を行った際には、陰極刺激付加時のみワインの酸味が弱まっていた。この点については、さらなる検証が必要である。





## 6. 展望

が，解明の余地があると考えられる．さらに，甘味に対する塩分付加による増強効果のように，ある味による他の味への効果増強に電気味覚を用いる手法も考えられる．

### 6.3.2 電気味覚分野

本研究は，電氣的刺激による味質の変化を食品に付加するにあたり，電気味覚分野で報告された知見を参考に，効果を類推し，装置やシステムに役立てている．そして，金属電極の直接接触でなく，食品を介した場合にも先行の知見と同様の効果が得られるかについても検証している．現状で検証を行えているのは，電気味覚に関して得られている知見のごく一部であることも確かである．電気味覚において今後導出される知見を試作装置の新たな活用法に反映させることが出来るだろう．これまでの他の知見の飲食環境における追証や，今後導出される知見の応用を行うことで，試作装置の新たな活用法を開拓出来るだろう．

その反面，本研究の使用環境では制御能力における制限があると考えられる．たとえば先行研究では任意の味質の付加について調査したものも存在するが，それら研究では提示面積が制御性に影響を与えることが示されている．本研究の実使用環境においては，食品のサイズが限定されないため，知見が全て活用できるとは限らない．

また，温度を用いた味質の制御を電氣的刺激とともに行う研究も行われているが，本研究で付加対象としている食品は調理，加工，そして飲食において最適とされる温度が限定されており，システムによって任意に温度を変更すると元の食品の食味を害する可能性がある．また，食品の組成によって熱伝導率が異なるため，システムによる温度制御がより複雑になると考えられる．逆に言えば，対象の食品が飲食されるとき温度はある程度定まっているともいえるため，その温度にあわせた電氣的刺激の付加を行うことも出来るだろう．本研究では飲食行為を対象としたため調理時点







## 6. 展望

での加工については言及していないが、今後の展望として、調理過程を考慮した付加のデザインを考えていくことも視野に入れている。

その上で、本研究に基づいたさらなる活用を行う際には、様々な食品の組成における味質評価が求められる。この評価においても、組成、形状（状態）、含有栄養素などの配分や、表面の質感を変化させた評価用食品を作ることで、食品との相関を詳細に導出できるのではないかと考えられる。

### 6.3.3 情報科学分野

飲食における情報科学技術の活用は、他感覚からの刺激によって味の変化を錯覚的に導出するものが多く研究されていた。それら研究の目的は本研究と親和性があるため、他感覚からの刺激と電気味覚による味質の付加の併用とその効果についても検証の余地がある。

味情報を出力する食器を提案したことが、本研究の情報科学分野に対するもっとも大きな貢献であるともいえる。食器の形状を参考とした提案が本研究以前になかったわけではない。たとえば Lover's Cups[106]などは、カップの装置で、カップの傾きなどを検知し、それに応じて光らせる構造を持っている。また、関連研究にあげた鳴海らの飲料への LED 光投影による色重畳システムも、カップ及び味袋を有する構造である。しかし、両者共に、味情報そのものを直接的に出力しているわけではない。

そして、この食器や食器を用いた情報の出力は、今後の展望の中でも大きな位置をしめる。本研究での食器への実装とそのために必要とされた安全面への配慮、そして展望で述べた改善に関する知見については、今後素材の選定、検証や構造の改良を行うなかで、食器型デバイスを作成する際に参考となるガイドラインとして成熟させていく予定である。







## 6. 展望

### 6.3.4 HCI 分野

食および味覚における HCI 技術，特に味覚制御とその HCI 的活用は，論文執筆現在では視覚や聴覚と比べまだ萌芽的段階だろう．しかし今後一大分野として成熟していく可能性を有していると考えている．

第 1 章でも述べたとおり，食は多くの意味や役割を持つ．そして，人の生活や健康と密着している．HCI 分野で提案される技術は人と密接に関わり，人の生活における様々な問題を解決することを目的としている．ならば，食や食に深く関わる味覚は，HCI 技術が展開されるべき一大分野であるはずである．実際に調理や食事記録に関する研究は様々な手法が提案されつつある．味覚の制御も，機構的特性からくる制御の難しさを乗り越えられれば，視覚や聴覚に並ぶ程の分野として台頭していくはずである．

本研究の HCI 分野への貢献は，まず食品の味覚・感覚および嗜好機能に対する制御手法を構築し，HCI 技術を活用した食の拡張と健康支援につながる提案を行った点である．本研究では制御同期へのコンピュータ活用にとどまっているが，電氣的刺激の制御はコンピュータからの制御も行いやすいものであり，今後さらなる自動化や利用者の食事のログに合わせた提示などを追求していくことができるだろう．次に，味情報の出力において，AR (Augmented Reality) 技術として提案した点である．これまでも飲食行為や食事環境に対する AR 技術は提案されてきた．また，電気味覚の活用としては Nimesha らが味覚における味の仮想的再現，VR (Virtual Reality) 技術として提案を行っている．

本研究は，味における AR 技術であるといえる．しかも，味覚器に対する出力を用いた AR 技術である．また，本研究で行った塩味味覚感度制御や，6.2.3 であげた味覚拡張などは，味情報における AR であるとともに，人間側の拡張 (AH:Augmented human) であるともいえる．本論文では食品の機能の拡張の観点から電気味覚を活用したが，特に 6.2.3 であげた味覚拡張





## 6. 展望

などは、味センサなどを用いることで本来人間が感知できない味や弁別できない濃度差を電気味覚に置き換え提示することができる。そのため、食品の機能の拡張だけでなく、人間の能力の拡張につながると考えられる。さらなる展望として、情報化学や情報ガストロノミーのような分野の創出も考えられる。電氣的刺激によって人間の感覚器や知覚を変容させることで、食品の組成が変わったように感じさせる手法は、視覚や聴覚、触覚を使った感覚間相互作用による提案はなされているが、味覚そのものにアプローチする例はきわめて少ない。飲食行為への情報技術の介入によって人の感覚を変容させることで、人以外の外界が変化したように感じさせる技術は、まだ萌芽的ではあるものの、人間と食の関係を大きく変化させる可能性を十分に有しているだろう。





## 謝辞

### 謝辞

本研究を行うにあたり、ご指導を賜った明治大学大学院理工学研究科新領域創造専攻宮下芳明准教授に深く感謝致します。宮下准教授には、分野転向からこの博士論文テーマに関する議論に至るまでに、研究の素晴らしさや研究者に求められる様々な要素、研究内容に対する示唆やアドバイスをいただきました。

また、本研究の発展及び本論文の執筆にあたり、数多くの貴重な助言を頂いた東京大学情報学環暦本純一教授、明治大学大学院理工学研究科新領域創造専攻福地健太郎准教授に感謝致します。また、未踏 IT 人材発掘・育成事業においてプロジェクトマネージャーを担当くださった後藤真孝産業技術総合研究所情報技術研究部門首席研究員にも多くの貴重な助言を頂きました。

そして、快く評価実験にご協力頂いた被験者の方々に感謝致します。

宮下研究室の皆様には、日常の議論や発表などの機会を通じて、研究の着想の機会や、モチベーションを高める機会をたくさん頂きました。また、発表・参加した研究会に参加された皆様からは、議論や討論を通じて非常に多くの有用な意見を頂きました。

本研究と成果発表の一部については、日本学術振興会特別研究員奨励費、ならびに情報処理推進機構未踏 IT 人材発掘・育成事業 2010 年度未踏ユースの助成を受けました。

本論文は、音楽学科に在籍しつつ人の知覚や感性について学び、その後理転して視覚情報に対してのアプローチを修士論文にまとめた筆者の博士論文となっています。これだけ多分な興味の中を自由に探求してこられたのも、幼少期から私の興味や関心を最大限に育て、最大限に優先してくれ





## 謝辞

た家族，そして日本各地で私と様々な議論を繰り広げてくれた全ての友人  
のお陰です．ここに感謝の意を表しつつ，本論文の結びと致します．





## 参考文献

- [1] 電子情報通信学会 ヒューマンコミュニケーショングループ料理メディア研究会  
<http://www.ccm.media.kyoto-u.ac.jp/CM>
- [2] 電子情報通信学会 ヒューマンコミュニケーショングループ食メディア研究会  
<http://www.ccm.media.kyoto-u.ac.jp/CEA/>
- [3] 矢野俊正, 「食品機能の系統的解析と展開」 について (食品研究の新しい潮流-1-( 세미나-室)), 化学と生物 Vol.25, No.2, pp.111-113, 1987.
- [4] 佐藤昌康, 味覚の生理学, p.1, 誠信書房, 1991.
- [5] 森本俊文, 新・口腔の生理から?を解く, デンタルダイヤモンド社, p.31, 2012.
- [6] 富田寛, 味覚障害の全貌, 第二章 舌の形態と機能, p.22, 診断と治療社, 2011.
- [7] 前掲書, p.26
- [8] Yoshiro Mochizuki. An Observation on the Numerical and Topographical Relations of Taste Buds to Circumvallate Papillae of Japanese. Okajimas Folia Anatomica Japonica, Vol.15, No.6, pp.595-608, 1937.
- [9] Yoshiro Mochizuki. Studies on the Papilla Foliata of Japanese. 2. The number of taste buds. Okajimas Folia Anatomica Japonica, Vol. 18, No.4-5, pp.355-369, 1939.
- [10] Inglis, J, Miller. Human fungiform taste bud density and distribution, Annals of The New York Academy of Sciences, Vol.510, No.1, pp.501-503, 1987.
- [11] 前掲書, pp.62-65.





## 参考文献

- [12] Takashi Yamamoto, Noriyuki Yuyama, Takuya Kato, Yojiro Kawamura. Gustatory responses of cortical neurons in rats. II. Information processing of taste quality, *Journal of neurophysiology* Vol.53, No.6, pp.1356-1369, 1985.
- [13] 栗原堅三. 味覚・嗅覚. 化学同人, 1990.
- [14] 山本隆, 河村洋二郎: 味覚反応時間について, 第 10 回味と匂のシンポジウム論文集, pp. 68-71, 1976.
- [15] Takashi Yamamoto, Yojiro Kawamura. Gustatory reaction time in human adults, *Physiology and Behaviour*, Vol.26, Issue.4, pp. 715-719, 1981.
- [16] 前掲書, p.12.
- [17] Haruyuki Yamashita, Sarroch Theerasilp, Toshihiro Aiuchi, Kazuyasu Nakaya, Yasuharu Nakamura, Yoshie Kurihara. Purification and complete amino acid sequence of a new type of sweet protein taste-modifying activity, curculin. *Journal of Biological chemistry*, Vol.265, No.26, pp.15770-15775, 1990.
- [18] Yoshie Kurihara. Characteristics of antisweet substances, sweet proteins, and sweetness-inducing proteins. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition* Vol.32, Issue.3, pp.231-252, 1992.
- [19] 伏木 亨. 味覚と嗜好のサイエンス, pp.27-28, 丸善, 2008.
- [20] 相澤清晴, 小川誠. 食とコンピューティング: 3. マルチメディア食事記録と画像処理による食事内容解析, 情報処理, Vol.52, No.11, pp.1382-1387, 2011.
- [21] 武川直樹. 食とコンピューティング: 5. 食事コミュニケーションの分析と応用 - 一緒に食べる楽しさを共有できるシステム開発のために, 情報処理, Vol.52, No.11, pp.1397-1402, 2011.
- [22] 高橋哲朗, 井手一郎. 食とコンピューティング: 2. レシピ・献立検索, 情報処理, Vol.52, No.11, pp.1376-1381, 2011.





## 参考文献

- [23] 料理を取り巻く情報メディア技術論文特集, 電子情報通信学会論文誌 A Vol.J94-A, No.7, 2011.
- [24] 坂井信之, 森川直. 食物のおいしさ評価における視覚イメージの役割, 日本味と匂学会誌, Vol.13, No.3, pp.463-466, 2006.
- [25] 数野千恵子, 渡部絵里香, 藤田綾子, 増尾侑子. ゼリーの色が味覚の判別に与える影響, 実践女子大学生生活科学部紀要, Vol.43, pp.1-7, 2006.
- [26] 富田圭子, 北山祥子, 小野真紀子, 饗庭照美, 大谷貴美子. テーブルクロスの色が味覚に及ぼす影響, 日本色彩学会誌, Vol. 28(supplement), pp.38-39, 2004.
- [27] Maki Mori, Kazutaka, Kurihara, Koji Tsukada, Itiro Siio. Dining Presenter: Augmented Reality system for a dining table top, Supplemental Proceedings of the 11th Ubicomp 2009, pp. 168-169, 2009.
- [28] Paul Rozin. Taste-smell confusions and the duality of the olfactory sense, Perception and Psychophysics, Vol.31, pp.397-401, 1982.
- [29] Takuji Narumi, Munehiko Sato, Tomohiro Tanikawa, Michitaka Hirose. Evaluating Cross-Sensory Perception of Superimposing Virtual Color onto Real Drink: Toward Realization of Pseudo-Gustatory Displays, ACM the 1st augmented Human International Conference, pp.18:1-6, 2010.
- [30] Takuji Narumi, Shinya Nishizaka, Takashi Kajinami, Tomohiro Tanikawa, and Michitaka Hirose. Augmented Reality Flavor: Gustatory Display Based on Edible Marker and Cross-Modal Interaction, CHI'11 Proceedings of the 2011 annual conference on Human factors in computing systems, pp.93-102, 2011.
- [31] 鳴海拓志, 伴祐樹, 梶波崇, 谷川智洋, 廣瀬通孝. 拡張現実感を利用した食品ボリュームの操作による満腹感の操作, 情報処理学会論文誌,







## 参考文献

- Vol.54, No.4, pp.1422-1432, 2013.
- [32] Hiroo Iwata, Hiroaki Yano, Takahiro Uemura, Tetsuro Moriya.  
Food Simulator : A Haptic Interface for Biting, Proceedings of the  
IEEE Virtual Reality 2004, pp.51-57, 2004.
- [33] Massimiliano Zampini, Charles Spence. THE ROLE OF  
AUDITORY CUES IN MODULATING THE PERCEIVED  
CRISPNESS AND STALENESS OF POTATO CHIPS, Journal of  
Sensory Studies, Vol.19, Issue5, pp.347-363, 2004.
- [34] 増田真実, 山口泰優, 荒井観, 岡嶋克典. 聴覚情報が食品認識に与える  
影響, 電子情報通信学会技術研究報告.HIP, ヒューマン情報処理,  
Vol.108, No.356, pp.123-126, 2008.
- [35] Naoya Koizumi, Hidekazu Tanaka, Yuji Uema, Masahiko Inami.  
Chewing jockey : augmented food texture by using sound based on  
the cross-modal effect. In Proceedings of the 8th International  
Conference on Advances in Computer Entertainment Technology  
(ACE' 11), pp.21:1-4, 2011.
- [36] 山岡潤一, 木村孝基, 川鍋徹, 大嶋泰介, 中垣拳, 速水友里, 筧康明.  
TagCandy : 棒付き飴の食感拡張デバイスの提案, 第 10 回  
NICOGRAPH 春季大会, CD-ROM 予稿集, p26 : 1-2, 2011.
- [37] Yuki Hashimoto, Masahiko Inami, Hiroyuki Kajimoto. Straw-like  
User Interface (II) : a new method of presenting auditory sensations  
for a more natural experience, Haptics: Perception, Devices and  
Scenarios. Springer Berlin Heidelberg, pp.484-493, 2008.
- [38] Herv This. Molecular Gastronomy : Exploring the Science of Flavor  
(Arts and Traditions of the Table : Perspectives on Culinary History),  
Columbia University Press, 2005.
- [39] Patricia Cvetkovic, Srdjan Prodanovic. Eat a bit,  
<http://90.146.8.18/en/festival2008/program/project.asp?parent=143>





## 参考文献

84&iProjectID=14565#

- [40] Candy Fab,  
<http://wiki.candyfab.org/>
- [41] Brian Derby. Bioprinting: inkjet printing proteins and hybrid cell-containing materials and structures, *Journal of Materials Chemistry*, Vol.18, No.47, pp.5717-5721, 2008.
- [42] Choc edge,  
<https://chocedge.com/>
- [43] Jeffrey Lipton, Dave Arnold, Franz Nigl, Nastassia Lopez, Dan Cohen, Nils Norén, Hod Lipson. Multi-material food printing with complex internal structure suitable for conventional post-processing. *Solid Freeform Fabrication Symposium*. 2010.
- [44] Teresa F. Wegrzyn, Matt Golding, Richard H. Archer. Food Layered Manufacture: A new process for constructing solid foods. *Trends in Food Science & Technology*, Vol.27, Issue.2, pp. 66-72, 2012.
- [45] 大和田茂：ゼリープリンター，コンピュータソフトウェア，Vol.23, No.4, pp.47-50, 2006.
- [46] 橋田朋子，上岡玲子，大谷智子，キムジョンヒョン，久保友香，ソンヨンア，中島佐和子. Fruit Plotter：ドライフルーツ画素を用いた食べられるディスプレイシステム，インタラクシオン 2011 論文集, pp.163164, 2011.
- [47] Oleksiy Pikalo. Latte art machine. In *ACM SIGGRAPH 2008 new tech demos (SIGGRAPH' 08)*, pp.22:1, 2008.
- [48] Dilrukshi Abeyrathne, Roshan Lalintha Peiris, Nimesha Ranasinghe, Owen Noel Newton Fernando, and Adrian David Cheok. Food internet communication. In *Proceedings of the 7th International Conference on Advances in Computer Entertainment Technology (ACE' 10)*, pp.49-52, 2010.





## 参考文献

- [49] Jun Wei, Roshan Lalintha Peiris, Jeffrey Tzu Kwan Valino Koh, Xuan Wang, Yongsoon Choi, Xavier Roman Martinez, Remi Tache, Veronica Halupka, and Adrian David Cheok. Food Mediaexploring interactive entertainment over telepresent dinner. In Proceedings of the 8th International Conference on Advances in Computer Entertainment Technology (ACE' 11), pp.26 : 1-6, 2011.
- [50] 福地健太郎, 富山彰史, 城一裕 : Laser-Cooking : レーザーカッターを用いた自動調理法の開発, 情報処理学会研究報告, Vol.2011-HCI-144, No.19, 2011.
- [51] 喜多唯. プログラマブルフードの開発, 未踏 IT 人材発掘・育成事業 : 2012 年度  
[http://www.ipa.go.jp/jinzai/mitou/2012/2012\\_1/gaiyou/g-3.html](http://www.ipa.go.jp/jinzai/mitou/2012/2012_1/gaiyou/g-3.html)
- [52] Dan Maynes-Aminzade. Edible Bits : Seamless Interfaces between People, Data and Food, In Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI' 05), pp. 2207-2210, 2005.
- [53] Alessandro Volta. On the electricity excited by the mere contact of conducting substances of different kinds. in a letter from Mr. alexander Volta, frs professor of natural philosophy in the university of pavia, to the rt. hon. Sir joseph banks, bart. kbprs. Philosophical Transactions of the Royal Society of London 90, pp.403-431, 1800.
- [54] David A. Stevens, Diane Baker, Elizabeth Cutroni, Alexander Frey, David Pugh, Harry T. Lawless. A direct comparison of the taste of electrical and chemical stimuli, Chemical senses Vol.33, No. 5, pp. 405-413, 2008.
- [55] Zoran Bujas. Electric taste. In Handbook of Sensory Physiology. Vol. IV: Chemical Senses; Pt . 2 : Taste. L . M. Beidler, editor. Springer-Verlag, Berlin . pp.180-199, 1971.
- [56] 大場昭博. 電気性味覚の成立機序に関する研究, 口腔病学会雑誌, Vol.30, No.4, pp.329-343, 1962.





## 参考文献

- [57] Makoto Kashiwayanagi, Kiyonori Yoshii, Yonosuke Kobatake, Kenzo Kurihara. Taste transduction mechanism:similar effects of various modifications of gustatory receptors on neural responses to chemical and electrical stimulation. *The Journal of General Physiology*, Vol.78, No.3, pp.259-275, 1981.
- [58] 脇要. 舌電気刺激による誘発電位に関する研究, 日本口腔外科学会雑誌 Vol.39, No.6, pp.673-683, 1993.
- [59] Zoran Bujas, Silvija Szabo, Mirjana Kovačić, A. Rohaček. Adaptation effects on evoked electrical taste. *Perception & Psychophysics* Vol.15, Issue.2, pp.210-214, 1974.
- [60] Armand V Cardello. Comparison of taste qualities elicited by tactile, electrical, and chemical stimulation of single human taste papillae. *Perception & Psychophysics* Vol.29, Issue.2 pp.163-169, 1981.
- [61] Harry. T. Lawless, David. A. Stevens, Kathryn. W. Chapman, Anne Kurtz. Metallic taste from electrical and chemical stimulation. *Chemical senses* Vol.30, No.3, pp.185-194, 2005.
- [62] 龜井俊夫. 味覺ニ關スル實驗的研究 (第2報) 電氣味覺ニ關スル研究. 岡山医学会雑誌 Vol.48, No.2, pp.339-345, 1936.
- [63] Bent Krarup. Electro-gustometry: a method for clinical taste examinations. *Acta oto-laryngologica* Vol.49, No.1, pp.294-305, 1958.
- [64] Georg Von Békésy, Sweetness produced electrically on the tongue and its relation to taste theories. *Journal of Applied Physiology*, Vol.19, No.6, pp.1105-1113, 1964.
- [65] Jürgen Helmbrecht. Psychophysik des elektrischen geschmacks: Qualitäts-und intensitätsbeziehungen. *European Archives of Oto-Rhino-Laryngology* Vol.192, Issue.3, pp.314-324, 1968.
- [66] 富山紘彦, 富田寛, 奥田雪雄. 電氣味覺の正常値. 日本耳鼻咽喉科学会会報, Vol.74, No.11, pp.1580-1587, 1971.





## 参考文献

- [67] 高橋祥一郎, 後藤昌昭, 岡増一郎, 田代秀雄. 電気味覚の正常値について. 日本口腔外科学会雑誌 vol.25, No.5, pp.967-972, 1979.
- [68] M Scott Herness. The cathodal OFF response of electric taste in rats. *Experimental Brain Research* Vol.60, Issue.2, pp.318-322, 1985.
- [69] Dean Ajduković. Electrical taste stimulus: current intensity or current density?. *Chemical senses* Vol.15, Issue.3, pp.341-347, 1990.
- [70] 山本隆, 小林秀子, 松尾龍二, 河村洋二郎: 電気味覚計を用いての味覚反応時間測定について, 第12 回味と匂のシンポジウム論文集, pp.45-48, 1978.
- [71] 佐藤昌康, 小川尚: 味覚の化学, pp.183-189, 朝倉書店, 1997.
- [72] Bent Krarup. Electro-gustometry: a method for clinical taste examinations. *Acta oto-laryngologica* Vol.49, No.1, pp.294-305, 1958.
- [73] H. Feldmann, E. Maier. Neue methodische und differentialdiagnostische Gesichtspunkte zur Funktionsprüfung der Chorda tympani, *European Archives of Oto-Rhino-Laryngology*. Vol.174, Issue.5, pp 423-439, 1959.
- [74] Fred Harbert, Seymour Wagner, I.M. Young. The quantitative measurement of taste function. *Archives of Otolaryngology—Head & Neck Surgery*. Vol.75, No.2, p.138, 1962.
- [75] Jack L. Pulec, William F. House. Facial nerve involvement and testing in acoustic neuromas. *Archives of Otolaryngology—Head & Neck Surgery*. Vol.80, No.6, pp.685-692, 1964.
- [76] Bull T. R. Taste and the chorda tympani. *The Journal of Laryngology & Otology*, Vol.79, Issue.6, pp.479-493, 1965.
- [77] 富田寛. 顔面神経麻痺と Electrogustometry (電気味覚検査法). *耳鼻咽喉科臨床* Vol.61, No.4, pp.419-429, 1968.
- [78] 富田寛, 少名子正彬, 山田登, 都川紀正. 電気味覚計 (Elgustometer) 2, 3 の基礎的問題. *日本耳鼻咽喉科学会会報* Vol.72, No.4, pp.868-875, 1969.





## 参考文献

- [79] N Lucarelli, G. Stirpe. Simple electrostimulator for clinical gustometry. Bollettino della Società italiana di biologia sperimentale vol.55, No.11, pp.1072-1076, 1979.
- [80] J. A. Stillman, R. P. Morton, D. Goldsmith. Automated electrogustometry: a new paradigm for the estimation of taste detection thresholds. Clinical Otolaryngology & Allied Sciences Vol.25, No.2, pp.120-125, 2000.
- [81] 三吉康郎, 吉浦禎二, 木村知郎, 中根英晴. 臨床味覚検査法の一つとして電気性味覚検査法 Krarup 氏法の検討. 日本耳鼻咽喉科学会会報 Vol.71, No.10, pp.1477-1483, 1968.
- [82] 柳原尚明, 岸本正生. 電気味覚検査 (Electrogustometry) とその臨床的意義. 耳鼻咽喉科臨床 Vol.61, No.4, pp.430-435, 1968.
- [83] 北奥恵之, 山本俊宏, 成尾一彦, 松永喬. CNV を利用した電気味覚検査の客観化の試み. 日本耳鼻咽喉科学会会報 Vol.97, No.4, pp.696-702, 1994.
- [84] 中村浩, 東博二, 川本亮, 伊東明彦, 磯野道夫, 村田清高. "電気味覚閾値の信頼性について-随伴陰性変動を用いた電気味覚検査." 日本耳鼻咽喉科学會會報 Vol.103, No.10, pp.1161-1168, 2000.
- [85] 虫本栄子, 八重樫祐成, 吉田光宏, 佐藤博, 河上雄之介, 小野田利枝, 田中久敏. 電気味覚計を用いた味覚誘発電位記録法の検討."日本補綴歯科學會雜誌, Vol.49, No.4, pp.625-634, 2005.
- [86] Yuzo Ninomiya, Masaya Funakoshi. Selective procaine inhibition of rat chorda tympani responses to electric taste stimulation. Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Physiology Vol.92, Issue.2, pp.185-188, 1989.
- [87] Michael A. Barry, James C. Gatenby, Joel D. Zeiger, John C. Gore. Hemispheric dominance of cortical activity evoked by focal electrogustatory stimuli. Chemical senses Vol.26, Issue.5, pp.471-482, 2001.
- [88] Aimee Arnoldussen and Donald C. Fletcher. Visual Perception for the





## 参考文献

- Blind : The BrainPort Vision Device. Retinal Physician, Vol.9, No.1, pp.32-34, 2012.
- [89] Jose Vázquez-Buenosaires, Yohan Payan, Jacques Demongeot.  
Electro-stimulation of the tongue as a passive surgical guiding system, ICAR 03 Coimbra. IEEE Proceedings, pp. 638-643, 2003.
- [90] Nimesha Ranasinghe, Ryohei Nakatsu, Nii Hideaki, and Ponnampalam Gopalakrishnakone. Tongue Mounted Interface for Digitally Actuating the Sense of Taste, in Proceedings of the 16th IEEE International Symposium on Wearable Computers (ISWC), pp.80-87, 2012.
- [91] Emi Tamaki, Takashi Miyaki, Jun Rekimoto. PossessedHand: Techniques for controlling human hands using electrical muscles stimuli, Proceedings of the 2011 annual conference on Human factors in computing systems(ACM CHI2011), pp.543-552, 2011.
- [92] Hiroyuki Kajimoto. Electro-tactile Display with Real-time Impedance Feedback using Pulse Width Modulation, IEEE Trans. on Haptics, Vol.5, No.2, pp.184-188, 2012.
- [93] 竹谷是幸, IEC 規格による電気安全, pp.30-31.2001.
- [94] 富田寛, 再掲書, p109.
- [95] 中森玲奈, 塚田浩二, 椎尾一郎. 食ベテルミン. インタラクシオン2011 論文集, pp.367-370, 2011.
- [96] Azusa Kadomura, Kelvin Cheng-Yuan Li, Andy Yen-Chang Chen, Hao-Hua Chu, Koji Tsukada, Itiro Siio. Sensing fork and persuasive game for improving eating behavior. In Proceedings of the 2013 ACM conference on Pervasive and ubiquitous computing adjunct publication, pp.71-74, 2013.
- [97] HapiFork:  
<http://www.hapi.com/products-hapifork.asp>
- [98] 岩沢 康裕 編, 界面ハンドブック, 第2編 応用編, 第13章 食品, 第5節食品におけるレオロジー, p. 1106, エヌ・ティー・エス, 2001.







## 参考文献

- [99] 厚生労働省, 平成 22 年国民健康・栄養調査結果の概要,  
<http://www.mhlw.go.jp/stf/houdou/2r98520000020qbb.html>.
- [100] Ken Flegel, Peter Magnier. Get excess salt out of our diet, Canadian Medical Association Journal, Vol.180, No.3, p.263, 2009.
- [101] 厚生労働省, 日本人の食事摂取基準 (2010 年度版),  
<http://www.mhlw.go.jp/shingi/2009/05/s0529-4.html>
- [102] Paul A. S. Breslin, Gary K. Beauchamp: Salt enhances flavour by suppressing bitterness, Nature, Vol.387, p.563, 1997.
- [103] 金正貴美, 當目雅代, 野口英子, 竹内千夏. 嗜好品へのニーズを制限される患者が我慢を繰り返すプロセス, 日本看護研究学会雑誌, vol.34, No.5, pp.11-19, 2011.
- [104] Thomas P Hettinger, Marion E Frank. Salt taste inhibition by cathodal current, Brain Res Bul, vol.80, No.3, pp.107-115, 2009.
- [105] G. Lawrence, C. Salles, C. Septier, J. Busch, T. Thomas-Danguin. Odour-taste interactions: A way to enhance saltiness in low-salt content solutions. Food Quality and Preference, Vol.20, No.3, pp.241-248, 2009.
- [106] Hyemin Chung, Chia-Hsun Jackie Lee, Ted Selker. Lover's cups: drinking interfaces as new communication channels. CHI'06 extended abstracts on Human factors in computing systems, pp.375-380, 2006.





## 本研究に関する発表

### 本研究に関する発表論文

#### 査読付き学術論文：

- [1] 中村裕美, 宮下芳明. 電気味覚による味覚変化と視覚コンテンツの連動, 情報処理学会論文誌, Vol.53, No.3, pp.1092-1100, 2012.
- [2] 中村裕美, 宮下芳明. 食メディアにおける味情報提示手法のサーベイ, 日本ソフトウェア科学会論文誌 コンピュータソフトウェア, Vol.29, No.1, pp.65-75, 2013.
- [3] 中村裕美, 宮下芳明. 一極型電気味覚付加装置の提案と極性変化による味質変化の検討, 情報処理学会論文誌, Vol.54, No.4, pp.1442-1449, 2013.
- [4] 中村裕美, 宮下芳明. 塩分を用いない塩味味覚感度制御 —陰極刺激の提示と停止による飲食物の味質変化における評価—, 情報処理学会論文誌, 2014 (採録決定).

#### 国際学会発表：

##### 査読有り・口頭発表

- [5] Hiromi Nakamura, Homei Miyashita. Development and Evaluation of Interactive System for Synchronizing Electric Taste and Visual Content ,Proceedings of the 2012 ACM annual conference on Human Factors in Computing Systems (CHI2012), pp.517-520, 2012
- [6] Hiromi Nakamura and Homei Miyashita. Controlling saltiness without salt: evaluation of taste change by applying and releasing cathodal current. In Proceedings of the 5th international workshop on Multimedia for cooking & eating activities (CEA '13), pp.9-14, 2013.





## 本研究に関する発表

### 査読有り・デモ発表

- [7] Hiromi Nakamura, Homei Miyashita. Communication by Change in Taste, CHI2011 Conference Proceedings and Extended Abstracts, The 29th Annual CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, 2011.
- [8] Hiromi Nakamura, Homei Miyashita. Enhancing saltiness with cathodal current, ACM annual conference on Human Factors in Computing Systems (CHI2013), pp.3111-3114, 2013.

### 国内学会発表：

#### 査読有り・口頭発表

- [9] 中村裕美, 宮下芳明. 陰極刺激の提示と停止による塩分知覚強度制御, インタラクシオン 2013 論文集, pp.103-110, インタラクシオン 2013.

#### 査読なし・口頭発表

- [10] 中村裕美, 宮下芳明. 電気味覚を活用した飲食コミュニケーションの可能性, 情報処理学会研究報告, Vol.2011-HCI-142 No.11, 2011.
- [11] 中村裕美, 宮下芳明. 電気味覚の応用による食メディア開発, 信学技報, Vol.111, No.479, MVE2011-103, pp.49-54, 2012.

#### 査読なし・デモ発表

- [12] 中村裕美, 宮下芳明. 飲食物+電気味覚, 第 18 回インタラクティブシステムとソフトウェアに関するワークショップ (WISS2010), pp.204-206.2010.
- [13] 中村裕美, 宮下芳明. 電気味覚を活用した味覚の増幅と拡張, インタラク





## 本研究に関する発表

- ション 2011, pp.461-464, 2011.
- [14] 中村裕美, 宮下芳明. 減損塩味感: 足すだけではない, 新しい電気味覚のかたち, 第 20 回インタラクティブシステムとソフトウェアに関するワークショップ (WISS2012), 2012 (予稿集なし).
- [15] 中村裕美, 宮下芳明. 陰極刺激の提示と停止による塩分知覚強度制御, インタラクション 2013 論文集, pp.103-110, 2013.

### 受賞など:

- [16] ソネット賞銅賞, 第 18 回インタラクティブシステムとソフトウェアに関するワークショップ, 2010 年 12 月
- [17] 2010 年度「未踏 IT 人材発掘・育成事業」未踏ユース スーパークリエイター認定, 2011 年 12 月
- [18] MVE 賞, 電子情報通信学会 MVE 研究会, 2012 年 9 月
- [19] HC 賞, 電子情報通信学会ヒューマンコミュニケーショングループ, 2012 年 12 月
- [20] Best Paper Award, 5th Workshop on Multimedia for Cooking and Eating Activities, 2013 年 10 月

### その他(解説記事など):

- [21] Monika Hoinkis, Roger Ibars, Hiromi Nakamura, Homei Miyashita, Kurtis Heimerl, Brian Gawalt, Kuang Chen, Tapan Parikh, and Björn Hartmann. Demo hour. interactions Vol.19, Issue.6, pp.6-7,2012.
- [22] 中村裕美, Tongue-able interface が拓くインタラクション, ヒューマンインタフェース学会誌特集記事, Vol.15 No.1, pp.9-12, 2013.
- [23] Koray Tahiroğlu, Valtteri Wikström, Simon Overstall, Thomas Svedström, Johan Kildal, Teemu Ahmaniemi, Kiel Long, John Vines,





本研究に関する発表

Hiromi Nakamura, Home Miyashita, Eunjin Kim, and Romy Achituv.  
2014. Demo hour. interactions Vol.21, Issue.1, pp.10-13, 2014.

